

EP 27924 (4)



(11) **EP 1 235 112 A2**

(12) **EUROPÄISCHE PATENTANMELDUNG**

(43) Veröffentlichungstag:
28.08.2002 Patentblatt 2002/35

(51) Int Cl.7: **G03F 7/20, G02B 13/14,
G02B 13/18**

(21) Anmeldenummer: **02001958.4**

(22) Anmeldetag: **01.02.2002**

(84) Benannte Vertragsstaaten:
**AT BE CH CY DE DK ES FI FR GB GR IE IT LI LU
MC NL PT SE TR**
Benannte Erstreckungsstaaten:
AL LT LV MK RO SI

(72) Erfinder:
• **Schultz, Jörg**
73430 Aalen (DE)
• **Wangler, Johannes**
89551 Königsbrunn (DE)
• **Sohmer, Alexander**
73447 Oberkochen (DE)
• **Eppe, Alexander**
73431 Aalen (DE)
• **Grunwald, Jürgen**
verstorben (DE)

(30) Priorität: **23.02.2001 DE 10108677**

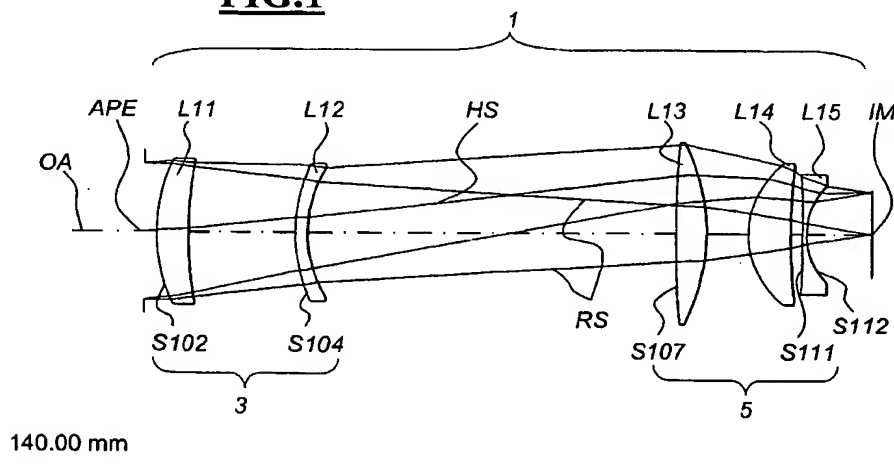
(71) Anmelder: **Carl Zeiss**
89518 Heidenheim (Brenz) (DE)

(54) **Teilobjektiv für Beleuchtungssystem**

(57) Teilobjektiv (1) mit einer optischen Achse (OA) zur Beleuchtung eines Bildfeldes, insbesondere in einer Beleuchtungseinrichtung einer Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlage, das zwischen einer Blende-ebene (APE) und einer Bildebene (IM) angeordnet ist. Das Teilobjektiv (1) umfaßt eine erste Linsengruppe (3) und eine zweite Linsengruppe (5) mit einer Linse (L15) mit einer ersten asphärischen Linsenfläche (S111). Die zweite Linsengruppe (5) weist mindestens eine erste Linse (L15) mit einer negativer Brechkraft und mindestens eine zweite Linse (L14) mit einer positiver Brechkraft auf. Die maximale Feldhöhe Y_{im}^{max} innerhalb des

Bildfeldes beträgt mindestens 40mm, während die bildseitige numerische Apertur mindestens 0,15 beträgt. Die Hauptstrahlen weisen innerhalb des Bildfeldes eine Feldhöhe Y_{im} und einen Hauptstrahlwinkel PF auf. Die Verteilung der Hauptstrahlwinkel PF über der Feldhöhe Y_{im} ist durch eine Pupillenfunktion $PF(Y_{im})$ gegeben, die sich aus einem linearen Beitrag $c_1 \cdot Y_{im}$ und einem nicht-linearen Beitrag $PF_{NL}(Y_{im})$ zusammensetzt, wobei der nichtlineare Beitrag $PF_{NL}(Y_{im})$ für die maximale positive Feldhöhe Y_{im}^{max} mindestens +15mrad beträgt.

FIG.1



Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft ein Teilobjektiv in einem Beleuchtungssystem einer Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlage, ein REMA-Objektiv, das ein derartiges Teilobjektiv aufweist und eine Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlage mit einem derartigen Teilobjektiv.

[0002] Das Teilobjektiv umfaßt eine erste und eine zweite Linsengruppe, die zwischen einer Blendenebene und einer Bildebene angeordnet sind, wobei sich in der Bildebene ein auszuleuchtendes Bildfeld befindet. Die Komponenten sind dabei zentriert um eine optische Achse angeordnet. Durch die Blendenebene treten Strahlenbündel mit je einem Hauptstrahl in das Teilobjektiv ein, wobei die Hauptstrahlen die optische Achse im Bereich der Blendenebene schneiden. Dabei beträgt der axiale Abstand der Schnittpunkte der Hauptstrahlen mit der optischen Achse maximal 10% des Durchmessers der Blende. Die axiale Ablage der Schnittpunkte hängt von den Aberrationen der Pupillenabbildung ab, die durch die vor dem Teilobjektiv angeordneten Systemteile eingeführt werden. Die Pupillenabbildung bezeichnet dabei die Abbildung zwischen Pupillenebenen. Der äußerste Hauptstrahl, der unter maximalem Winkel zur optischen Achse durch die Blendenebene läuft, trifft in der Bildebene auf den Rand des Bildfeldes. Das Strahlbündel, dessen Hauptstrahl entlang der optischen Achse verläuft, definiert ein Mittenbündel. Die erste Linsengruppe umfaßt dabei diejenigen Linsen, bei denen der äußerste Hauptstrahl dem Betrag nach kleinere Strahlhöhen an den Linsenflächen aufweist als der Randstrahl des Mittenbündels. Die zweite Linsengruppe umfaßt diejenigen Linsen, bei denen der äußerste Hauptstrahl dem Betrag nach größere Strahlhöhen an den Linsenflächen aufweist als der Randstrahl des Mittenbündels. Eine Linse der zweiten Linsengruppe weist dabei eine asphärische Linsenfläche auf.

[0003] Aus der DD 292 727 ist eine Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlage bekannt, die innerhalb der Beleuchtungseinrichtung zwischen einem Wabenkondensor und einer Struktur tragenden Maske ein gattungsgemäßes Teilobjektiv aufweist. Nach der Struktur tragenden Maske folgt im Strahlengang ein Projektionsobjektiv, das die Struktur tragende Maske beugungsbegrenzt auf ein lichtempfindliches Substrat abbildet. Der ersten Linsengruppe des Teilobjektives entspricht in der DD 292 727 der Kollimator und der zweiten Linsengruppe die aus einer Linse bestehende Feldlinse. Die Feldlinse weist dabei eine asphärische Korrekturfläche auf, um die Winkelverteilung der Hauptstrahlen in der Bildebene des Teilobjektives derart zu beeinflussen, daß die Bildebene des Projektionsobjektives nahezu telezentrisch beleuchtet wird. Durch die asphärische Korrekturfläche werden die Aberrationen der Pupillenabbildung zwischen der Blendenebene des Teilobjektives und der Blendenebene des Projektionsobjektives reduziert. Nachteilig an der Anordnung der DD 292 727 sind die begrenzten Möglichkeiten zur Korrektur der Pupillenabbildung, da die Feldlinse nur aus einer einzigen Linse mit positiver Brechkraft besteht. Zudem weist das Ausführungsbeispiel nur eine bildseitige numerische Apertur von 0,04 und eine maximale Feldhöhe von 71,75mm auf.

[0004] Aus der DE 195 48 805 A1 (US 5,982,558) und der DE 196 53 983 A1 (US serial No.09/125621) der Anmelderin sind sogenannte REMA-Objektive bekannt geworden. REMA-Objektive werden in Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlagen unmittelbar vor der Struktur tragenden Maske, dem sogenannten Retikel, eingesetzt. Sie bilden Maskierungseinrichtungen, sogenannte REMA (Reticle Masking)-Blades randscharf auf das Retikel ab. Die REMA-Blades sind gewöhnlich mit verstellbaren mechanischen Schneiden ausgeführt, durch die sich die Größe des Objektfeldes des nachfolgenden REMA-Objektives verändern läßt. Während in dem Ausführungsbeispiel der DE 195 48 805 A1 ein REMA-Objektiv mit rein sphärischen Linsen gezeigt ist, wird in der DE 196 53 983 A1 der Einsatz von asphärischen Linsen zur Reduzierung der Anzahl der Linsen innerhalb eines REMA-Objektives vorgeschlagen. Der Feldlinsenteil eines REMA-Objektives paßt dabei die Winkelverteilung der Hauptstrahlen des REMA-Objektives an die Winkelverteilung der Hauptstrahlen eines nachfolgenden Projektionsobjektives an, um einen kontinuierlichen Strahlverlauf zwischen dem REMA-Objektiv und dem Projektionsobjektiv zu erzielen.

[0005] Die EP 0 811 865 A2 zeigt ein Teilobjektiv, das zwischen einer Blendenebene und einer Bildebene angeordnet ist. In der Bildebene des Teilobjektives ist dabei nicht das Retikel, sondern eine Maskierungseinrichtung angeordnet, die mit einem nachfolgenden Objektv auf das Retikel abgebildet wird. Das Teilobjektiv hat deshalb keinen direkten Einfluß auf die Verteilung der Hauptstrahlwinkel an der Schnittstelle zwischen der Beleuchtungseinrichtung und einem nachfolgenden Projektionsobjektiv.

[0006] Mit modernen Projektionsobjektiven lassen sich mikrostrukturierte Bauteile mit Strukturgrößen unter 0,2µm herstellen. Um diese hohen Auflösungen zu erreichen, werden die Projektionsobjektive bei Wellenlängen von 248nm, insbesondere 193nm oder sogar 157nm betrieben und weisen bildseitige numerische Aperturen von größer als 0,65 auf. Gleichzeitig sind die Bildfelddurchmesser zum Teil größer als 20mm. Die Anforderungen an das optische Design für ein derartiges Projektionsobjektiv sind deshalb beträchtlich. Neben der Feldabbildung des Retikels auf das lichtempfindliche Substrat, dem sogenannten Wafer, ist auch die Pupillenabbildung zu korrigieren. So beeinflusst der zwischen Objektebene und Blendenebene angeordnete vordere Objektvteil eines Projektionsobjektives die Abbildung der Eintrittspupille auf die Blendenebene, während der zwischen Blendenebene und Bildebene angeordnete hintere Objektvteil die Abbildung der Blendenebene auf die Austrittspupille beeinflusst. Die Aberrationen der Pupillenabbildung des Projektionsobjektives zeigen sich dabei in der Verteilung der Hauptstrahlwinkel in der Objektebene des Projektionsobjektives.

[0007] Aufgabe der Erfindung ist es, gattungsgemäße Teilobjektive anzugeben, die eine Beeinflussung der Verteilung der Hauptstrahlwinkel in der Bildebene des Teilobjektives über weite Bereiche zulassen. Insbesondere sollen Aberrationen der Pupillenabbildung, die durch den vorderen Objektiveil eines nachfolgenden Projektionsobjektives eingeführt werden, kompensiert werden.

[0008] Gelöst wird diese Aufgabe mit einem Teilobjektiv gemäß Anspruch 1. Die spezielle Ausgestaltung der Erfindung wird in den abhängigen Ansprüchen 2 bis 23 beschrieben. Die Ansprüche 1 bis 18 betreffen das erfindungsgemäße Teilobjektiv, die Ansprüche 19 bis 22 den Einsatz eines derartigen Teilobjektives innerhalb eines REMA-Objektives. Die Verwendung des erfindungsgemäßen Teilobjektives in einer Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlage wird in Anspruch 23 beschrieben.

[0009] Die Verteilung der Hauptstrahlwinkel PF über der Feldhöhe Y_{im} in der Bildebene des erfindungsgemäßen Teilobjektives, die sogenannte Pupillenfunktion, läßt sich als Reihenentwicklung mit ungeraden Potenzen darstellen. Die Polynomreihe lautet:

$$PF(Y_{im}) = \sum_n c_n \cdot Y_{im}^n \quad (n = 1, 3, 5, 7, 9 \dots) \quad (1)$$

[0010] Die Hauptstrahlwinkel PF, die zwischen der Flächennormalen der Bildebene und dem jeweiligen Hauptstrahl bestimmt werden, sind im Uhrzeigersinn negativ definiert. Aus Symmetriegründen weist die Pupillenfunktion für ein um die optische Achse zentriertes System keine Beiträge mit geraden Potenzen auf. Würde das Beleuchtungssystem in der Bildebene des erfindungsgemäßen Teilobjektives keine Aberrationen der Pupillenabbildung aufweisen, so würde sich für jede Feldhöhe Y_{im} die gleiche axiale Position der Austrittspupille, also eine homozentrische Austrittspupille ergeben. Da alle Hauptstrahlen sich bei homozentrischer Austrittspupille in einem Punkt auf der optischen Achse schneiden, besteht ausschließlich ein linearer Zusammenhang zwischen der Feldhöhe Y_{im} und dem Tangens des Winkels für jeden Hauptstrahl. Bei sehr kleinen Hauptstrahlwinkeln, wie dies im folgenden der Fall sein wird, läßt sich der Tangens des Hauptstrahlwinkels durch den Winkel direkt annähern. Die Pupillenfunktion weist für eine homozentrische Pupille nur einen linearen Beitrag $c_1 \cdot Y_{im}$ auf, wobei der Koeffizient c_1 der Steigung der Pupillenfunktion bei $Y_{im} = 0$ mm entspricht. Durch die Aberrationen der Pupillenabbildung ergibt sich jedoch für jede Feldhöhe eine unterschiedliche axiale Position der Austrittspupille. Die feldabhängige Lage der Austrittspupille wird durch den nichtlinearen Beitrag

$$PF_{NL}(Y_{im}) = \sum_n c_n \cdot Y_{im}^n \quad (n = 3, 5, 7, 9 \dots) \quad (2)$$

der Pupillenfunktion beschrieben. Die Beiträge höherer Ordnung entsprechen dabei der sphärischen Winkelaberration der Pupillenabbildung, also der sphärischen Aberration als Winkelaberration ausgedrückt. Ein optisches System mit positiver Brechkraft ist ohne spezielle Korrekturmaßnahmen üblicherweise sphärisch unterkorrigiert, so daß der nichtlineare Beitrag PF_{NL} der Pupillenfunktion für eine positive Feldhöhe negativ ist. Die Pupillenfunktion des erfindungsgemäßen Teilobjektives weist dagegen einen nichtlinearen Beitrag PF_{NL} auf, der für positive Feldhöhen deutlich positiv ist. Der nichtlineare Beitrag $PF_{NL}(Y_{im}^{max})$ zum Hauptstrahlwinkel für die maximale positive Feldhöhe Y_{im}^{max} beträgt mindestens +15 mrad. Das Teilobjektiv führt somit eine starke Überkorrektur der sphärischen Aberration der Pupillenabbildung ein. Dies ist deshalb besonders vorteilhaft, weil dadurch das nachfolgende Projektionsobjektiv in Bezug auf die Pupillenabbildung sphärisch unterkorrigiert sein kann und sich damit im Projektionsobjektiv Korrektionsmittel einsparen lassen. Es ist immer günstiger, diese Korrektionsmittel im Beleuchtungssystem unterzubringen, da die Qualitätsanforderungen an optische Elemente in einem Projektionsobjektiv deutlich höher sind als an optische Elemente im Beleuchtungssystem. Das erfindungsgemäße Teilobjektiv erreicht nun diese Überkorrektur bei einem Bildfeld, das mindestens einen Durchmesser von 80 mm aufweist, und dessen bildseitige numerische Apertur mindestens 0,15 beträgt. Die bildseitige numerische Apertur bezeichnet dabei die durch den maximalen Blendendurchmesser des Teilobjektives mögliche numerische Apertur in der Bildebene. Der Lichtleitwert, der als Produkt von Bildfelddurchmesser und bildseitiger numerischer Apertur definiert ist, beträgt mindestens 12 mm. Die Überkorrektur der sphärischen Aberration der Pupillenabbildung läßt sich erreichen, wenn die zweite Linsengruppe des erfindungsgemäßen Teilobjektives aus mindestens zwei Linsen besteht, wobei eine erste Linse eine negative Brechkraft, eine zweite Linse eine positive Brechkraft aufweist.

[0011] Besonders vorteilhaft zur Korrektur der sphärischen Aberration der Pupillenabbildung ist es, wenn die erste Linse negativer Brechkraft eine zur Bildebene konkave Linsenfläche aufweist, so daß der Krümmungsradius dieser Fläche positiv ist.

[0012] Dabei ist es günstig, wenn das Verhältnis von Krümmungsradius und Linsendurchmesser der konkaven Linsenfläche kleiner als 1,0, vorzugsweise kleiner als 0,8 ist. Dieses Verhältnis ist nach unten durch den Wert 0,5 begrenzt, der sich für eine Halbkugel ergibt. Durch die stark gekrümmte konkave Linsenfläche ergeben sich große Inzidenzwinkel an dieser Linsenfläche für die Hauptstrahlen der achsfernen Bildpunkte und damit ein großer Beitrag zur Überkorrektur der sphärischen Aberration der Pupillenabbildung.

[0013] Die erste Linse negativer Brechkraft ist vorzugsweise als Meniskus ausgelegt. Bei Meniskus-Linsen weist der Scheitelradius der Vorder- und Rückfläche das gleiche Vorzeichen auf.

[0014] Die erste Linse mit negativer Brechkraft sollte dabei möglichst nahe an der Bildebene angeordnet sein. Es ist vorteilhaft, wenn bis auf planparallele Platten, wie beispielsweise Filter oder Abschlußplatten, welche auch mit Freiform-Korrekturflächen versehen sein können, keine weiteren optischen Elemente im Strahlengang zwischen der ersten Linse und der Bildebene angeordnet sind.

[0015] Zur Korrektur der Feldabbildung, also der Abbildung der Strahlenbüschel in die Bildebene, ist es vorteilhaft, wenn die konkave Linsenfläche der ersten Linse eine zur Bildebene nahezu konzentrische Fläche ist. In diesem Fall treffen die Strahlen des Mittenbüschel mit geringen Inzidenzwinkeln auf die konkave Linsenfläche. Dies ist gegeben, wenn das Verhältnis des Abstandes der Bildebene von dem Scheitel der konkaven Linsenfläche zum Betrag des Krümmungsradius der konkaven Linsenfläche einen Wert zwischen 0,7 und 1,3 aufweist. Während die Strahlen des Mittenbüschels nahezu ungebrochen durch die nahezu zur Bildebene konzentrische Linsenfläche treten, ergeben sich für die Strahlenbüschel der achsfernen Bildpunkte große Inzidenzwinkel. Die Fläche läßt sich somit ideal zur Korrektur der feldabhängigen Bildfehler einsetzen, während das Mittenbüschel nahezu unbeeinflusst bleibt.

[0016] Befinden sich zwischen der ersten Linse mit der zur Bildebene konkaven Linsenfläche und der Bildebene keine weiteren Linsen mit optischer Brechkraft, so ist es vorteilhaft, wenn der halbe Krümmungsradius der konkaven Linsenfläche deutlich größer oder kleiner als der Abstand des Scheitels der konkaven Linsenfläche von der Bildebene ist. Diese Forderung an den Krümmungsradius der konkaven Linsenfläche kommt dann zum Tragen, wenn sich in der Bildebene das Retikel befindet, das üblicherweise einen Teil der auftreffenden Lichtstrahlen in das Teilobjektiv zurück reflektiert. Da jede optische Fläche selbst bei einer Antireflex-Beschichtung eine Restreflexion aufweist, würde das von der Maske reflektierte Licht an der zur Bildebene konkaven Linsenfläche wiederum in Richtung der Maske reflektiert. Bei einer nahezu telezentrischen Beleuchtung der Maske würde sich ein Störreflex ergeben, wenn sich die Bildebene im Abstand der Brennweite der als Spiegel wirkenden konkaven Linsenfläche befinden würde. Die Brennweite eines Konkavspiegels ist durch den halben Krümmungsradius gegeben. Ein Störreflex kann vernachlässigt werden, wenn der Betrag der Differenz des Abstandes der konkaven Linsenfläche von der Bildebene und der Brennweite größer ist als der Betrag der Brennweite mit dem Faktor 0,3 multipliziert.

[0017] Die Minimierung der Störreflexe wird auch für die anderen Flächen der zweiten Linsengruppe berücksichtigt. Damit zwischen dem Retikel und den Linsenflächen der zweiten Linsengruppe keine Störreflexe entstehen, ist die zweite Linsengruppe derart aufgebaut, daß der äußerste Hauptstrahl, der mit maximalem Winkel zur optischen Achse durch die Blende ebene läuft, nach einer Reflexion an der Bildebene und einer Reflexion an einer Linsenfläche der zweiten Linsengruppe in der Bildebene eine Strahlhöhe aufweist, die mindestens 30% der maximalen Feldhöhe $Y_{\text{im}}^{\text{max}}$ beträgt. Bei konstanter Brechkraft des Teilobjektives läßt sich dies durch die Variation der Durchbiegung der Linsenflächen erreichen. Der äußerste Hauptstrahl wird deshalb zur Abschätzung der Störreflexe herangezogen, da sein Schnittpunkt mit der Bildebene den 50%-Punkt des Störreflexes markiert. Würde der äußerste Hauptstrahl jedoch die Bildebene im Bereich der optischen Achse schneiden, so würden alle weiteren Hauptstrahlen ebenfalls in diesem Bereich die Bildebene schneiden und die zweifach reflektierten Strahlbüschel in einem engen Bereich um die optische Achse auftreffen, so daß sich ein deutlicher Störreflex ergibt.

[0018] Die erste asphärische Linsenfläche zeichnet sich durch eine große Pfeilhöhenabweichung von mindestens 0,2mm, vorzugsweise 0,4mm bezüglich einer Hüllsphäre aus. Diese großen Asphärizitäten sind ein weiteres Korrektionsmittel, um die Überkorrektur der sphärischen Aberration der Pupillenabbildung bereitzustellen. Die Pfeilhöhen sind als Abstände zwischen der asphärischen Linsenfläche und der Hüllsphäre in Richtung der optischen Achse definiert. Als Hüllsphäre wird eine sphärische Fläche bezeichnet, die den gleichen Scheitel wie die asphärische Fläche aufweist und die asphärische Linsenfläche am Rand des ausgeleuchteten Bereiches der asphärischen Linsenfläche schneidet. Der ausgeleuchtete Bereich wird durch die Randstrahlen des Strahlenbüschels des äußersten Hauptstrahls begrenzt.

[0019] Erschwerend für die Auslegung des Teilobjektives kommt hinzu, daß der bildseitige Arbeitsabstand des Teilobjektives mindestens 30mm, vorzugsweise mindestens 40mm betragen sollte. Der freie Arbeitsabstand bezeichnet dabei den Abstand der Bildebene vom Scheitel der letzten optischen Fläche des Teilobjektives, wobei dieser Abstand um die maximale Pfeilhöhe der letzten optischen Fläche verringert wird, falls es sich bei dieser Fläche um eine konkave Fläche handelt. Der freie Arbeitsabstand ermöglicht den freien Zugang zur Bildebene, in der sich üblicherweise das Retikel befindet. Vorrichtungen zum Positionieren und Wechseln des Retikels müssen in diesen Raum eingreifen können.

[0020] Mit dem erfindungsgemäßen Teilobjektiv ist es möglich, die sphärische Aberration der Pupillenabbildung der-

art überzukorrigieren, daß der nichtlineare Beitrag $PF_{NL}(Y_{im}^{max})$ zum Hauptstrahlwinkel für die maximale positive Feldhöhe Y_{im}^{max} mindestens +25mrad beträgt.

[0021] ^{im} Dies läßt sich unter anderem dadurch erreichen, daß die zweite Linsengruppe eine zweite asphärische Linsenfläche aufweist.

[0022] Die maximale Pfeilhöhenabweichung der zweiten asphärischen Linsenfläche von der Hüllsphäre sollte möglichst größer als 0,2mm, vorzugsweise größer als 0,4mm sein.

[0023] Es ist vorteilhaft, wenn für die maximale Feldhöhe Y_{im}^{max} das Verhältnis des nichtlinearen Beitrags $PF_{NL}(Y_{im}^{max})$ zum linearen Beitrag $c_1 \cdot Y_{im}^{max}$ im Bereich von -0,5 und -2,0 liegt. Dann läßt sich durch den linearen Anteil der Pupillenfunktion der nichtlineare Anteil für die maximale Feldhöhe teilweise kompensieren, so daß sich für die positiven Feldhöhen nahezu gleich große maximale und minimale Hauptstrahlwinkel ergeben und die Hauptstrahlen für diese Feldhöhen im Mittel parallel zur optischen Achse verlaufen. Der lineare Anteil der Pupillenfunktion wird über die paraxiale Lage der Austrittspupille eingestellt.

[0024] Neben der Beeinflussung der sphärischen Aberration der Pupillenabbildung fokussiert das Teilobjektiv die eintretenden Strahlbüschel auf Spotbilder mit minimalem Durchmesser in der Bildebene. Dazu ist die Korrektur der Feldabbildung erforderlich. Der maximale Spotdurchmesser für alle Spotbilder beträgt vorteilhafterweise 2% der maximalen Feldhöhe Y_{im}^{max} . Zur Bestimmung des Spotbildes und des Spotdurchmessers werden die Strahlenbüschel bei voller Öffnung der Blende betrachtet, so daß die Strahlenbüschel die maximale bildseitige numerische Apertur ausleuchten. Das Spotbild ist dabei durch die Durchstoßpunkte der Strahlen eines Strahlenbüschels mit der Bildebene gegeben. Als Korrektionsmittel steht primär die erste Linsengruppe zur Verfügung, die vorteilhafterweise aus einem Meniskus mit positiver Brechkraft und einem Meniskus mit negativer Brechkraft besteht. Zusätzlich ist es günstig, in der ersten Linsengruppe eine asphärische Linsenfläche vorzusehen.

[0025] Zur gleichzeitigen Korrektur der Pupillenabbildung und der Feldabbildung ist es günstig, wenn die zweite Linse mit positiver Brechkraft ein Meniskus ist.

[0026] Vorteilhafterweise besteht die zweite Linsengruppe aus drei bis fünf Linsen, um die Feldabbildung zu korrigieren, die sphärische Aberration der Pupillenabbildung überzukorrigieren und eine gleichmäßige Beleuchtung des Bildfeldes zu gewährleisten.

[0027] Dies ist insbesondere durch den zusätzlichen Einsatz einer Bikonvexlinse in der zweiten Linsengruppe möglich.

[0028] Das erfindungsgemäße Teilobjektiv läßt sich vorteilhaft innerhalb eines REMA-Objektives einsetzen, wobei das REMA-Objektiv ein Objektfeld mit drei- bis achtfacher Vergrößerung auf ein Bildfeld abbildet. Das REMA-Objektiv besteht dabei aus einem ersten Teilobjektiv zwischen der Objektebene und der Blendenebene und dem erfindungsgemäßen Teilobjektiv. Beide Teilobjektive weisen dabei eine gemeinsame optische Achse auf. Die Vergrößerung des REMA-Objektives läßt sich über das Verhältnis der Brennweiten des ersten und zweiten Teilobjektives einstellen. Von der Objektebene ausgehende Hauptstrahlen müssen dabei nicht unbedingt die Blendenebene in einem Punkt schneiden, wenn die Pupillenabbildung des ersten Teilobjektives oder der vor dem REMA-Objektiv angeordneten optischen Komponenten fehlerbehaftet ist.

[0029] Da das REMA-Objektiv die in der Objektebene des REMA-Objektives angeordnete Maskierungseinrichtung möglichst scharf auf die Bildebene, in der das Retikel angeordnet ist, abbilden soll, weisen die Spotbilder der Objektpunkte in der Bildebene minimale Durchmesser auf. Der maximale Durchmesser der Spotbilder beträgt 2% der maximalen Feldhöhe Y_{im}^{max} . Zur Bestimmung des maximalen Spotdurchmessers werden Strahlbüschel bei maximaler Blendeneröffnung, die der maximalen bildseitigen numerischen Apertur entspricht, verwendet.

[0030] Vorteilhafterweise befindet sich die Eintrittspupille des REMA-Objektives im Unendlichen, so daß die Hauptstrahlen der Strahlbüschel nach der Objektebene parallel zur optischen Achse und damit telezentrisch verlaufen. Durch diese Maßnahme ist der Abbildungsmaßstab des REMA-Objektives unabhängig von einer Defokussierung des Objektes, in diesem Fall der Maskierungseinrichtung.

[0031] Neben den Hauptstrahlen, die über die Pupillenabbildung definiert sind, sind in der Bildebene des REMA-Objektives auch die energetischen Schwerstrahlen von Bedeutung. Der energetische Schwerstrahl eines Strahlenbüschels stellt dabei den Strahl dar, der sich aus einer Mittelung über alle Strahlen des betrachteten Strahlenbüschels ergibt, wobei jeder Strahlen gemäß der Ausleuchtung der Eintrittspupille ein energetisches Gewicht aufweist. Für eine Feldhöhe Y_{im} hängt die Richtung des entsprechenden energetischen Schwerstrahls von den Aberrationen des REMA-Objektives in Zusammenhang mit der Ausleuchtung der Eintrittspupille des REMA-Objektives ab. Die energetischen Schwerstrahlen lassen sich beispielsweise für eine vollständige Ausleuchtung der Eintrittspupille oder für eine nur teilweise Beleuchtung der Eintrittspupille bestimmen, wobei die Beleuchtung jeweils nahezu punktsymmetrisch zur optischen Achse ist. Das REMA-Objektiv ist nun so aufgebaut, daß die maximale Winkelabweichung zwischen energetischem Schwerstrahl und Hauptstrahl für alle Feldhöhen kleiner als 2mrad, vorzugsweise kleiner als 1 mrad ist. Erreicht wird diese Forderung zusammen mit den Anforderungen an die Feld- und Pupillenabbildung mit einem REMA-Objektiv, das acht bis zwölf Linsen mit endlicher Brennweite umfaßt, wobei das erste Teilobjektiv drei bis fünf Linsen, das zweite Teilobjektiv fünf bis sieben Linsen aufweist. Zusätzlich ist der Einsatz von drei bis fünf asphärischen

Flächen vorteilhaft.

[0032] Das erfindungsgemäße Teilobjektiv wird vorteilhafterweise in einer Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlage eingesetzt, wobei unmittelbar auf das Teilobjektiv ein Projektionsobjektiv folgt. Die Schnittstelle zwischen Beleuchtungssystem und Projektionsobjektiv stellt somit die Bildebene des Teilobjektives, beziehungsweise die Objektebene des Projektionsobjektives dar. Teilobjektiv und Projektionsobjektiv sind dabei zentriert um eine gemeinsame optische Achse angeordnet. Um einen kontinuierlichen Verlauf der Strahlbüschel von Beleuchtungssystem und Projektionsobjektiv zu gewährleisten, muß die Verteilung der Hauptstrahlwinkel des Teilobjektives an die Verteilung der Hauptstrahlwinkel des Projektionsobjektives an dieser Schnittstelle angepaßt sein. Die Abweichung der Pupillenfunktion des Teilobjektives von der objektseitigen Objektiv-Pupillenfunktion ist dabei vorteilhafterweise für alle Feldhöhen innerhalb des Bildfeldes des Teilobjektives kleiner als 2mrad, vorzugsweise kleiner als 1mrad. Ist diese Bedingung erfüllt, so bilden das Teilobjektiv und das Projektionsobjektiv in Bezug auf die Pupillenabbildung eine funktionelle Einheit. Projektionsobjektive, die an das erfindungsgemäße Teilobjektiv angepaßt sind, können dabei eine deutliche Unterkorrektur der sphärischen Aberration der Pupillenabbildung aufweisen, da mit dem Teilobjektiv die Aberrationen des Projektionsobjektives kompensiert werden können. Das entspannt die optische Korrektur des Projektionsobjektives wesentlich.

[0033] Entsprechend ist es vorteilhaft, ein REMA-Objektiv in einer Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlage einzusetzen, wobei das REMA-Objektiv ein erfindungsgemäßes Teilobjektiv umfaßt.

[0034] Näher erläutert wird die Erfindung anhand der Zeichnungen.

Figur 1 zeigt den Linsenschnitt eines erfindungsgemäßen Teilobjektives;

Figur 2 zeigt ein Diagramm der Pupillenfunktion des Teilobjektives der Figur 1;

Figur 3 zeigt den Linsenschnitt eines ersten Ausführungsbeispiels eines REMA-Objektives;

Figur 4 zeigt ein Diagramm der Abweichung der Pupillenfunktion des REMA-Objektives der Figur 3 von der Verteilung der Schwerstrahlwinkel über der Feldhöhe;

Figur 5 zeigt den Linsenschnitt eines zweiten Ausführungsbeispiels eines REMA-Objektives;

Figur 6 zeigt ein Diagramm der Abweichung der Pupillenfunktion des REMA-Objektives der Figur 6 von der Verteilung der Schwerstrahlwinkel über der Feldhöhe;

Figur 7 zeigt eine Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlage mit einem erfindungsgemäßen Teilobjektiv in schematischer Darstellung;

Figur 8 zeigt ein Diagramm der Abweichung der Pupillenfunktion des REMA-Objektives der Figur 3 von der objektseitigen Objektiv-Pupillenfunktion eines Projektionsobjektives gemäß Figur 2 aus DE 19942291.8;

Figur 9 zeigt ein weiteres Ausführungsbeispiel einer Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlage mit einem erfindungsgemäßen REMA-Objektiv in schematischer Darstellung; und

Figur 10 zeigt ein Diagramm der Abweichung der Pupillenfunktion des REMA-Objektives der Figur 6 von der objektseitigen Objektiv-Pupillenfunktion eines Projektionsobjektives gemäß Figur 8 aus DE 19942291.8.

[0035] In Figur 1 ist der Linsenschnitt eines erfindungsgemäßen Teilobjektives 1 dargestellt. Neben den Linsen sind die Randstrahlen RS des Mittenbüschels, sowie der äußerste Hauptstrahl HS und die das Strahlbüschel des äußersten Hauptstrahls begrenzenden Strahlen eingezeichnet. Das Teilobjektiv 1 ist dabei rotationsymmetrisch um die optische Achse OA aufgebaut. Die Systemdaten sind in Tabelle 1 aufgeführt. Als Linsenmaterial wird in diesem Ausführungsbeispiel Quarz (SiO_2) eingesetzt, das bei der Arbeitswellenlänge $\lambda = 193,3\text{nm}$ eine Brechzahl von 1,5603 aufweist. Als Linsenmaterial können auch Fluorid-Kristalle zum Einsatz kommen, wenn die Transmission erhöht werden oder das Teilobjektiv bei Wellenlängen von 157nm oder 126nm zum Einsatz kommen soll. Mit dem Teilobjektiv 1 wird in der Bildebene IM ein Bildfeld ausgeleuchtet, dessen Durchmesser 116,0mm beträgt. Die bildseitige numerische Apertur beträgt 0,18. Somit weist das Teilobjektiv einen Lichtleitwert von 20,7mm auf.

[0036] Durch die Blende APE mit einem Durchmesser von 187,9mm treten parallele Strahlenbüschel in das Teilobjektiv ein, die in der Bildebene IM auf je einen Spot fokussiert werden. Innerhalb des Bildfeldes beträgt für alle Bildpunkte der maximale Spotdurchmesser 160µm. Die Größe des Spotdurchmessers wird durch die Korrektur der Feldabbildung und insbesondere durch die Korrektur der Bildschalen und der Öffnungsfehler bestimmt.

[0037] Die Hauptstrahlen der Strahlenbündel schneiden beim Eintritt in das Teilobjektiv 1 der Figur 1 die optische Achse OA in der Mitte der Blendenebene APE. Der Winkel eines Hauptstrahls in der Blendenebene APE in Bezug auf die optische Achse korrespondiert dabei zu der Feldhöhe Y_{im} des Hauptstrahls in der Bildebene IM. Der maximale Winkel eines Hauptstrahls in der Blendenebene APE beträgt $6,3^\circ$ und entspricht in der Bildebene IM einer Feldhöhe Y_{im}^{max} von 58,0mm. Die Brennweite des Teilobjektives 1 beträgt 487,7mm. Die Pupillenfunktion $PF(Y_{im})$ des Teilobjektives 1, welche die Winkelverteilung der Hauptstrahlen in der Bildebene angibt, ist in Fig. 2 als durchgezogene Linie 27 dargestellt. Die Hauptstrahlwinkel weisen für die positiven Feldhöhen Werte im Bereich von $-5,3\text{mrad}$ und $+7,9\text{mrad}$ auf, so daß die Hauptstrahlen für positive Feldhöhen im Mittel nahezu parallel zur optischen Achse verlaufen. Die Pupillenfunktion läßt sich als Polynomreihe gemäß Gleichung (1) entwickeln, deren Koeffizienten der Tabelle 2 zu entnehmen sind. Der Koeffizient c_1 erster Ordnung entspricht dabei der Steigung der Pupillenfunktion bei $Y_{im} = 0\text{mm}$ und gibt die paraxiale Lage der Austrittspupille, beziehungsweise die Lage der Austrittspupille bei aberrationsfreier Pupillenabbildung an. Die Koeffizienten der dritten und höherer Ordnungen beschreiben die sphärische Aberration der Pupillenabbildung. In Figur 2 ist der lineare Beitrag zur Pupillenfunktion als gestrichelte Linie 28 mit Quadraten als Markierung, der nichtlineare Beitrag als gestrichelte Linie 29 mit Dreiecken als Markierung eingezeichnet.

Tabelle 2:

Koeffizienten der Polynomreihe		
	Koeffizient	Polynombeiträge bei $Y_{im}^{max} = 58,0\text{mm}$
c_1	$-2,8566\text{E-}01\text{mrad/mm}$	$-16,60\text{ mrad}$
c_3	$1,2526\text{E-}04\text{mrad/mm}^3$	$24,57\text{ mrad}$
c_5	$-3,9215\text{E-}09\text{mrad/mm}^5$	$-2,60\text{ mrad}$
c_7	$6,4435\text{E-}13\text{mrad/mm}^7$	$1,44\text{ mrad}$
c_9	$1,5273\text{E-}16\text{mrad/mm}^9$	$1,15\text{ mrad}$

[0038] In der dritten Spalte von Tabelle 2 sind die Polynombeiträge $c_n \cdot Y_{im}^n$ angegeben, die sich für die maximale positive Feldhöhe $Y_{im}^{max} = +58,0\text{mm}$ für die jeweilige Ordnung n ergeben. Der größte Beitrag zur sphärischen Aberration der Pupillenabbildung für die maximale positive Feldhöhe Y_{im}^{max} ist der Beitrag dritter Ordnung mit $+24,6\text{mrad}$ ist. Der gesamte nichtlineare Beitrag beträgt $+24,6\text{mrad}$. Da der nichtlineare Beitrag für die positive Feldhöhe ein positives Vorzeichen hat, ist die sphärische Aberration deutlich überkorrigiert. Das Verhältnis von nichtlinearem Beitrag zu linearem Beitrag beträgt für die maximale Feldhöhe Y_{im}^{max} $-1,48$.

[0039] Das Teilobjektiv 1 ist aus einer ersten Linsengruppe 3 und einer zweiten Linsengruppe 5 aufgebaut. Die erste Linsengruppe 3 besteht aus der Linse L11 mit positiver Brechkraft und der Linse L12 mit negativer Brechkraft. Innerhalb der ersten Linsengruppe 3 verläuft der äußerste Hauptstrahl HS zwischen der optischen Achse OA und dem Randstrahl RS des Mittenbündels. Die Linsen L11 und L12 weisen die asphärischen Linsenflächen S102 und S104 auf. Sowohl die Linse L11 wie auch die Linse L12 sind Menisken, deren konvexe Linsenfläche zur Blendenebene APE zeigen. Die erste Linsengruppe 3 trägt hauptsächlich zur Korrektur der Feldabbildung und damit zur Minimierung des Spotdurchmessers der Bildpunkte bei.

[0040] Bei den Linsen der zweiten Linsengruppe 5 verläuft der Randstrahl RS des Mittenbündels zwischen der optischen Achse OA und dem äußersten Hauptstrahl HS. Zwischen der ersten Linsengruppe 3 und zweiten Linsengruppe 5 befindet sich ausreichend Bauraum, um einen Umlenkspiegel einzubringen. Mit dem Umlenkspiegel kann beispielsweise der Beleuchtungsstrahlengang um 90° abgelenkt werden. Alternativ ist es auch möglich, einen Strahlteiler einzubringen, um einen Teil des Beleuchtungslichtes für Meßzwecke auszukoppeln. Verwendet man einen Polarisations-Strahlteilerwürfel, so kann Licht aus zwei Lichtkanälen nahezu verlustfrei überlagert werden. Dazu ist die Strahlteilerschicht bei der 45° -Umlenkung des Strahlteilerwürfels derart ausgelegt, daß Licht, das senkrecht zur Einfallsebene polarisiert ist, nahezu vollständig reflektiert, während Licht, das parallel zur Einfallsebene polarisiert ist, nahezu vollständig transmittiert wird. Diese Anordnung wird im Ausführungsbeispiel der Figur 7 näher erläutert.

[0041] Die zweite Linsengruppe 5 in Figur 1 arbeitet als Feldlinse, die hauptsächlich die Pupillenabbildung beeinflusst. Zudem läßt sich die Verzeichnung in der Feldabbildung korrigieren, so daß sich die Intensitätsverteilung in der Bildebene IM korrigieren und anpassen läßt. Um diese Anforderungen zu erfüllen, ist die zweite Linsengruppe 5 aus der Bikonvexlinse L13 mit positiver Brechkraft, dem Meniskus L14 mit positiver Brechkraft und der Linse L15 mit negativer Brechkraft aufgebaut. Die Linsenfläche S111 ist eine asphärische Linsenfläche, deren Flächenbeschreibung in Tabelle 1 gegeben ist. Der Radius der Hüllsphäre, welche die asphärische Linsenfläche S111 am Scheitel und am Rand des ausgeleuchteten Bereichs bei 80,4mm schneidet, beträgt $-2218,4\text{mm}$, so daß die maximale Pfeilhöhenabweichung zwischen der asphärischen Linsenfläche S111 und der Hüllsphäre $0,28\text{mm}$ beträgt.

[0042] Die Linse L15 mit negativer Brechkraft weist eine zur Bildebene konkave Linsenfläche S112 auf, wobei das Verhältnis von Krümmungsradius zu Linsendurchmesser 0,75 beträgt. Die Linse L15 ist in Lichtrichtung die letzte Linse mit Brechkraft vor der Bildebene IM, so daß die konkave Linsenfläche S112 unmittelbar vor der Bildebene IM angeordnet ist. Der freie Arbeitsabstand zwischen der letzten Linse L15 und der Bildebene IM beträgt 50,0mm.

[0043] Der freie Arbeitsabstand beschreibt den Bereich entlang der optischen Achse OA, in dem sich keine optischen Elemente des Teilobjektives befinden. Es besteht jedoch die Möglichkeit, nach der Linse L15 eine planparallele Abschlußplatte oder Intensitätsfilter anzubringen, die jedoch nur zu einer Verschiebung der Bildebene IM des Teilobjektives 1 führen.

[0044] Das Teilobjektiv 1 kommt üblicherweise in einer Beleuchtungseinrichtung einer Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlage unmittelbar vor dem Retikel zum Einsatz. Da das Retikel einen Teil des einfallenden Lichtes in das Teilobjektiv 1 zurückreflektiert, sind die Linsen der zweiten Linsengruppe 5 vorteilhaft derart ausgelegt, daß Störreflexe minimiert werden, die dadurch zustande kommen, daß das am Retikel reflektierte Licht an einer Linsenfläche ein zweites Mal reflektiert wird und wieder auf das Retikel gelangt. Die Minimierung der Störreflexe wird erreicht, indem das Teilobjektiv 1 derart ausgelegt wird, daß der äußerste Hauptstrahl HS nach zweifacher Reflexion am Retikel und an einer Linsenfläche die Bildebene IM weit außerhalb der optischen Achse OA schneidet. Bei den Linsenflächen S107 und S112 gelangt der zweifach reflektierte Hauptstrahl HS zurück in die Bildebene IM, während bei Störreflexen zwischen der Bildebene und den Linsenflächen S108, S109, S110 und S111 der äußerte Hauptstrahl gar nicht mehr in die Bildebene gelangt, sondern auf die Fassung des Teilobjektives 1 trifft. Bei Störreflexen zwischen der Bildebene und der Linsenfläche S107 schneidet der äußerste Hauptstrahl die Bildebene bei einer Höhe von 37,3mm, was einem Höhenverhältnis von 64,3% in Bezug auf die maximale Feldhöhe Y_{im}^{max} entspricht. Bei Störreflexen zwischen der Bildebene und der Linsenfläche S112 schneidet der äußerste Hauptstrahl die Bildebene bei einer Höhe von 107,7mm, was einem Höhenverhältnis von 185,7% in Bezug auf die maximale Feldhöhe Y_{im}^{max} entspricht, so daß der zweifach reflektierte Hauptstrahl außerhalb des Bildfeldes auf die Bildebene IM trifft.

[0045] Die zur Bildebene IM konkave Linsenfläche S112 ist kritisch für Störreflexe, wenn nach der Linse L15 keine weiteren Linsen mit Brechkraft folgen. Wäre der Abstand der Bildebene IM vom Scheitel der Linsenfläche S112 gleich dem halben Krümmungsradius der Linsenfläche S112, so würde das von dem zu beleuchtenden Objekt in der Bildebene IM zurückreflektierte Licht in die Bildebene IM fokussiert werden, wenn die Bildebene IM nahezu telezentrisch wie im vorliegenden Fall beleuchtet wird. Die konkave Linsenfläche S112 weist dagegen einen Krümmungsradius von 100,7mm und einen Abstand von der Bildebene IM von 79,7mm auf, so daß die Brennebene der konkaven Linsenfläche S112, die zur Berechnung der Störreflexe als Spiegel fungiert, einen Abstand von 29,4mm zur Bildebene IM hat. Das Verhältnis dieses Abstandes zum halben Krümmungsradius beträgt 0,6, so daß sich ein möglicher Störreflex nur unwesentlich auswirkt.

[0046] Damit das Mittenbüschel mit geringen Inzidenzwinkeln auf die konkave Linsenfläche S112 trifft und somit geringe Aberrationen für die Feldabbildung eingeführt werden, wird die konkave Linsenfläche S112 möglichst konzentrisch zur Bildebene IM angeordnet. Das Verhältnis des Abstandes der Bildebene IM von dem Scheitel der konkaven Linsenfläche S112 zum Betrag des Krümmungsradius der konkaven Linsenfläche S112 beträgt 0,79.

[0047] In Figur 3 ist der Linsenschnitt eines ersten Ausführungsbeispiels eines REMA-Objektives 309 dargestellt. Neben den Linsen sind die Randstrahlen RS des Mittenbüschels, sowie der äußerste Hauptstrahl HS und die das Strahlbüschel des äußersten Hauptstrahls HS begrenzenden Strahlen eingezeichnet. Das REMA-Objektiv 309 ist dabei rotationssymmetrisch um die optische Achse OA aufgebaut. Die Systemdaten sind in Tabelle 3 aufgeführt. Als Linsenmaterialien werden in diesem Ausführungsbeispiel Kalziumfluorid-Kristall CaF_2 und Quarz (SiO_2) eingesetzt, die bei der Arbeitswellenlänge $\lambda = 193,3nm$ eine Brechzahl von 1,5014 beziehungsweise 1,5603 aufweisen. Die den Elementen von Figur 1 entsprechenden Elemente in Figur 3 haben die gleichen Bezugszeichen wie in Figur 1 vermehrt um die Zahl 300. Für eine Beschreibung dieser Elemente wird auf die Beschreibung zu Figur 1 verwiesen.

[0048] Das REMA-Objektiv 309 der Figur 3 bildet ein Objektfeld mit einer Vergrößerung von $\beta = -3,74$ auf ein Bildfeld ab. Es besteht dabei aus einem ersten Teilobjektiv 311 und einem zweiten Teilobjektiv 301, dessen Aufbau ähnlich zu dem Aufbau des Teilobjektives 1 der Figur 1 ist. Mit dem REMA-Objektiv 309 wird in der Bildebene IM ein Bildfeld ausgeleuchtet, dessen Durchmesser 116,2mm beträgt. Die bildseitige numerische Apertur beträgt 0,18. Somit weist das REMA-Objektiv 309 einen Lichtleitwert von 20,9mm auf. Die Eintrittspupille des REMA-Objektives 309 befindet sich im Unendlichen, so daß die Hauptstrahlen in der Objektebene OBJ parallel zur optischen Achse OA verlaufen. Die Pupillenabbildung des ersten Teilobjektives 311 ist möglichst gut korrigiert. Dennoch schneiden die Hauptstrahlen durch die von dem ersten Teilobjektiv 311 eingeführte sphärische Aberration und Bildfeldkrümmung der Pupillenabbildung die optische Achse OA nicht direkt in der Blendenebene APE, sondern abhängig von der Objekthöhe mit einer axialen Ablage in Bezug auf die Blendenebene APE. Beim REMA-Objektiv 309 der Figur 3 liegen die Schnittpunkte der Hauptstrahlen mit der optischen Achse OA in einem axialen Bereich von 5,4mm. Dies entspricht 2,9% des Blendendurchmessers, der 188mm beträgt.

[0049] Die von der Objektebene OBJ ausgehenden Strahlenbüschel werden in der Bildebene IM auf einen Spot fokussiert. Innerhalb des Bildfeldes beträgt für alle Bildpunkte der maximale Durchmesser der Spotbilder 240µm.

[0050] Die Pupillenfunktion des REMA-Objektives 309 läßt sich als Polynomreihe gemäß Gleichung (1) entwickeln, deren Koeffizienten in Tabelle 4 gegeben sind.

Tabelle 4: Koeffizienten der Polynomreihe

Koeffizienten der Polynomreihe		
	Koeffizient	Polynombeiträge bei $Y_{\text{im}}^{\text{max}} = 58,1\text{mm}$
c_1	-2,8278E-01 mrad/mm	-16,43 mrad
c_3	1,0607E-04 mrad/mm ³	20,08 mrad
c_5	6,5595E-09 mrad/mm ⁵	4,34 mrad
c_7	-7,5251E-13 mrad/mm ⁷	-1,68 mrad
c_9	7,9719E-17 mrad/mm ⁹	0,60 mrad

[0051] Tabelle 4 ist zu entnehmen, daß der größte Beitrag zur sphärischen Aberration der Pupillenabbildung für die maximale positive Feldhöhe $Y_{\text{im}}^{\text{max}}$ der Beitrag dritter Ordnung mit +20,1mrad ist. Der gesamte nichtlineare Beitrag beträgt +24,1mrad, so daß die sphärische Aberration deutlich überkorrigiert ist. Das Verhältnis von nichtlinearem Beitrag zu linearem Beitrag beträgt für die maximale Feldhöhe $Y_{\text{im}}^{\text{max}}$ -1,46.

[0052] Das zweite Teilobjektiv 301 ist aus der ersten Linsengruppe 303 und der zweiten Linsengruppe 305 aufgebaut. Zu der ersten Linsengruppe 303 sind die Linsen L35 und L36 zu rechnen, wobei Linse L35 ein Meniskus mit positiver Brechkraft und Linse L36 ein Meniskus mit negativer Brechkraft ist. Die konvexe Fläche der Menisken ist dabei jeweils der Blendenebene APE zugewandt. Die Linsen der ersten Linsengruppe 303 weisen jeweils eine asphärische Linsenfläche S311 und S313 auf.

[0053] Die zweite Linsengruppe 305 des zweiten Teilobjektives 301 ist aus dem Meniskus L37 mit positiver Brechkraft, dessen konvexe Linsenfläche der Bildebene IM zugewandt ist, dem Meniskus L38 mit positiver Brechkraft, dessen konvexe Linsenfläche der Blendenebene APE zugewandt ist, sowie dem Meniskus L39 mit negativer Brechkraft, dessen konvexe Fläche der Blendenebene APE zugewandt ist, aufgebaut. Die Linsenfläche S320 ist eine asphärische Linsenfläche, deren Flächenbeschreibung in Tabelle 3 gegeben ist. Der Radius der Hüllsphäre, welche die asphärische Linsenfläche S320 am Scheitel und am Rand des ausgeleuchteten Bereiches der asphärischen Linsenfläche S320 bei einer Höhe von 81,1mm schneidet, beträgt 317,1mm, so daß die maximale Pfeilhöhenabweichung zwischen der asphärischen Linsenfläche S320 und der Hüllsphäre 0,87mm beträgt.

[0054] Die Linse L39 mit negativer Brechkraft weist eine zur Bildebene IM konkave Linsenfläche S321 auf, wobei das Verhältnis von Krümmungsradius zu Linsendurchmesser 0,74 beträgt. Die Linse L39 ist die letzte Linse mit Brechkraft vor der Bildebene IM, so daß die konkave Linsenfläche S321 unmittelbar vor der Bildebene IM angeordnet ist. Der freie Arbeitsabstand zwischen der letzten Linse L39 und der Bildebene IM beträgt 64,8mm.

[0055] Da in der Bildebene IM des REMA-Objektives 309 das Retikel angeordnet wird, müssen die Linsen der zweiten Linsengruppe 305 des zweiten Teilobjektives 301 auf Minimierung der Störreflexe optimiert werden, die sich zwischen dem teilweise reflektierenden Retikel und den mit Restreflexen behafteten Linsenflächen ausbilden können. Kritisch für Störreflexe sind die Linsenflächen S316, S319, S320 und S321, während bei den Linsenflächen S317 und S318 der am Retikel und den benannten Linsenflächen reflektierte äußere Hauptstrahl HS nicht mehr in die Bildebene gelangt, sondern noch innerhalb des REMA-Objektives 309 auf die Objektivfassung trifft. Bei Störreflexen zwischen der Bildebene IM und der Linsenfläche S316 schneidet der zweifach reflektierte Hauptstrahl HS die Bildebene IM bei einer Höhe von 41,9mm, was einem Höhenverhältnis von 72% in Bezug auf die maximale Feldhöhe $Y_{\text{im}}^{\text{max}}$ entspricht. Bei Störreflexen zwischen der Bildebene IM und der Linsenfläche S319 schneidet der zweifach reflektierte Hauptstrahl HS die Bildebene IM bei einer Höhe von 59,8mm, was einem Höhenverhältnis von 102,9% in Bezug auf die maximale Feldhöhe $Y_{\text{im}}^{\text{max}}$ entspricht. Bei Störreflexen zwischen der Bildebene IM und der Linsenfläche S320 schneidet der zweifach reflektierte Hauptstrahl HS die Bildebene IM bei einer Höhe von 83,3mm, was einem Höhenverhältnis von 143,4% in Bezug auf die maximale Feldhöhe $Y_{\text{im}}^{\text{max}}$ entspricht. Bei Störreflexen zwischen der Bildebene IM und der Linsenfläche S321 schneidet der zweifach reflektierte Hauptstrahl HS die Bildebene IM bei einer Höhe von 158,8mm, was einem Höhenverhältnis von 273,3% in Bezug auf die maximale Feldhöhe $Y_{\text{im}}^{\text{max}}$ entspricht.

[0056] Die konkave Linsenfläche S321 weist einen Krümmungsradius von 101,80mm und einen Abstand von der Bildebene IM von 91,62mm auf, so daß die Brennebene der konkaven Linsenfläche S321, die zur Berechnung der Störreflexe als Spiegel fungiert, einen Abstand von 40,7mm zur Bildebene IM hat. Das Verhältnis dieses Abstandes zum halben Krümmungsradius beträgt 0,8, so daß sich ein möglicher Störreflex nur unwesentlich auswirkt.

[0057] Damit das Mittenbüschel mit geringen Inzidenzwinkeln auf die konkave Linsenfläche S321 trifft und somit geringe Aberrationen für die Feldabbildung eingeführt werden, wird die konkave Linsenfläche S321 möglichst konzen-

trisch zur Bildebene IM angeordnet. Das Verhältnis des Abstandes der Bildebene IM von dem Scheitel der konkaven Linsenfläche S321 zum Betrag des Krümmungsradius der konkaven Linsenfläche S321 beträgt 0,90.

[0058] Durch die Aberrationen der Feldabbildung des REMA-Objektives 309 stimmt der für einen Bildpunkt der energetische Schwerstrahl nicht mit dem entsprechenden Hauptstrahl überein. Während in der Objektebene OBJ der energetische Schwerstrahl und der Hauptstrahl für jeden Bildpunkt übereinstimmen und parallel zur optischen Achse OA verlaufen, führen Koma und schiefe sphärische Aberration bei Bildpunkten außerhalb der optischen Achse OA zu einer Differenz zwischen energetischem Schwerstrahl und Hauptstrahl. Die Richtung des energetischen Schwerstrahls hängt dabei von der Ausdehnung der Strahlenbüschel in der Blendenebene APE ab. Leuchtet ein Strahlenbüschel die Blendenebene APE vollständig aus, so ist auf Grund der größeren Koma eine größere Abweichung der energetischen Schwerstrahlen von den Hauptstrahlen zu erwarten als bei Strahlenbüscheln, welche die Blendenebene APE nur in einem Bereich um die optische Achse OA ausleuchten. Extrem werden die Koma-Beiträge bei annularer Ausleuchtung der Blendenebene APE, da in diesem Fall die Strahlenbüschel nur die äußeren Aperturstrahlen aufweisen. Die Koma und die schiefe sphärische Aberration sind bei dem REMA-Objektiv 309 der Figur 3 so korrigiert, daß die Abweichung der Winkel der energetischen Schwerstrahlen bei vollständiger Ausleuchtung der Blendenebene von den Hauptstrahlwinkeln für alle Feldhöhen kleiner als $\pm 0,5 \text{ mrad}$ ist. Die Winkelabweichung ist in Figur 4 für positive Feldhöhen als durchgezogene Linie dargestellt.

[0059] In Figur 5 ist der Linsenschnitt eines zweiten Ausführungsbeispiels eines REMA-Objektivs 509 dargestellt. Neben den Linsen sind die Randstrahlen RS des Mittenbüschels, sowie der äußerste Hauptstrahl HS und die das Strahlbüschel des äußersten Hauptstrahls HS begrenzenden Strahlen eingezeichnet. Das REMA-Objektiv 509 ist dabei rotationssymmetrisch um die optische Achse OA aufgebaut. Die Systemdaten sind in Tabelle 5 aufgeführt. Als Linsenmaterial wird in diesem Ausführungsbeispiel Quarz (SiO_2) eingesetzt, das bei der Arbeitswellenlänge $\lambda = 248,3 \text{ nm}$ eine Brechzahl von 1,5084 aufweist. Die den Elementen von Figur 1 und Figur 3 entsprechenden Elemente in Figur 3 haben die gleichen Bezugszeichen wie in Figur 1, beziehungsweise Figur 3 vermehrt um die Zahl 500, beziehungsweise 200. Für eine Beschreibung dieser Elemente wird auf die Beschreibung zu Figur 1, beziehungsweise Figur 3 verwiesen.

[0060] Das REMA-Objektiv 509 der Figur 5 bildet ein Objektfeld mit einer Vergrößerung von $\beta = -3,50$ auf ein Bildfeld ab. Es besteht dabei aus einem ersten Teilobjektiv 511 und einem zweiten Teilobjektiv 501. Mit dem REMA-Objektiv 509 wird in der Bildebene IM ein Bildfeld ausgeleuchtet, dessen Durchmesser 113,3 mm beträgt. Die bildseitige numerische Apertur beträgt 0,19. Somit weist das REMA-Objektiv 509 einen Lichtleitwert von 21,5 mm auf, der nochmals größer ist als der Lichtleitwert des REMA-Objektives 309 der Figur 3. Die Eintrittspupille des REMA-Objektives 509 befindet sich im Unendlichen, so daß die Hauptstrahlen in der Objektebene OBJ parallel zur optischen Achse OA verlaufen. Durch die sphärische Aberration und Bildfeldkrümmung der Pupillenabbildung, die durch das erste Teilobjektiv 511 eingeführt wird, schneiden die Hauptstrahlen die optische Achse OA mit einer axialen Ablage zur Blendenebene APE. Beim REMA-Objektiv 509 der Figur 5 liegen die Schnittpunkte der Hauptstrahlen mit der optischen Achse OA 8,2 mm auseinander. Dieser Abstand entspricht 3,8% des Blendendurchmessers, der 217,2 mm beträgt.

[0061] Die von der Objektebene OBJ ausgehenden Strahlenbüschel werden in der Bildebene IM auf je ein Spotbild fokussiert. Innerhalb des Bildfeldes beträgt für alle Bildpunkte der maximale Durchmesser der Spotbilder 260 μm .

[0062] Die Pupillenfunktion des REMA-Objektives 509 läßt sich als Polynomreihe gemäß Gleichung (1) entwickeln, deren Koeffizienten in Tabelle 6 gegeben sind.

Tabelle 6:

Koeffizienten der Polynomreihe		
	Koeffizient	Polynombeiträge bei $Y_{\text{lm}}^{\text{max}} = 56,6 \text{ mm}$
c_1	-5,341302E-01 mrad/mm	-30,23 mrad
c_3	2,526716E-04 mrad/mm ³	45,81 mrad
c_5	-8,320880E-09 mrad/mm ⁵	-4,83 mrad
c_7	2,120363E-12 mrad/mm ⁷	3,95 mrad
c_9	-6,339048E-17 mrad/mm ⁹	-0,38 mrad

[0063] Tabelle 6 ist zu entnehmen, daß der größte Beitrag zur sphärischen Aberration der Pupillenabbildung für die maximale positive Feldhöhe $Y_{\text{lm}}^{\text{max}}$ der Beitrag dritter Ordnung mit +45,8 ist. Der gesamte nichtlineare Beitrag beträgt +44,5 mrad, so daß die sphärische Aberration im Vergleich zum ersten Ausführungsbeispiel eines REMA-Objektives noch deutlich stärker überkorrigiert ist. Das Verhältnis von nichtlinearem Beitrag zu linearem Beitrag beträgt für die maximale Feldhöhe $Y_{\text{lm}}^{\text{max}}$ -1,47.

[0064] Das zweite Teilobjektiv 501 des REMA-Objektivs ist aus einer ersten Linsengruppe 503 und einer zweiten Linsengruppe 505 aufgebaut. Zu der ersten Linsengruppe 503 sind die Linsen L56 und L57 zu rechnen, wobei Linse L56 ein Meniskus mit positiver Brechkraft und Linse L57 ein Meniskus mit negativer Brechkraft ist. Die konvexe Fläche der Menisken ist dabei jeweils der Blendenebene APE zugewandt. Die Linse L56 weist die asphärische Linsenfläche S513 auf.

[0065] Die zweite Linsengruppe 505 des zweiten Teilobjektivs 501 ist aus dem Meniskus L58 mit positiver Brechkraft, dessen konvexe Linsenfläche der Blendenebene APE zugewandt ist, dem Meniskus L59 mit positiver Brechkraft, dessen konvexe Linsenfläche der Bildebene IM zugewandt ist, der Bikonvexlinse L510 mit positiver Brechkraft, sowie dem Meniskus L511 mit negativer Brechkraft, dessen konvexe Fläche der Blendenebene APE zugewandt ist, aufgebaut. Die Linsenfläche S523 ist eine asphärische Linsenfläche, deren Flächenbeschreibung in Tabelle 5 gegeben ist. Der Radius der Hüllsphäre, welche die asphärische Linsenfläche S523 am Scheitel und am Rand des ausgeleuchteten Bereichs der asphärischen Linsenfläche S523 bei 99,6mm schneidet, beträgt 238,6mm, so daß die maximale Pfeilhöhenabweichung zwischen der asphärischen Linsenfläche S523 und der Hüllsphäre -1,61mm beträgt. Die zweite Linsengruppe 505 enthält eine weitere asphärische Linsenfläche S518, um die große Überkorrektur der sphärischen Aberration der Pupillenabbildung bereitstellen zu können. Der Radius der Hüllsphäre, welche die asphärische Linsenfläche S518 am Scheitel und am Rand des ausgeleuchteten Bereichs der asphärischen Linsenfläche bei 109,9mm schneidet, beträgt 170,1mm, so daß die maximale Pfeilhöhenabweichung zwischen der asphärischen Linsenfläche S518 und der Hüllsphäre 1,66mm beträgt.

[0066] Die Linse L511 weist eine zur Bildebene IM konkave Linsenfläche S525 auf, wobei das Verhältnis von Krümmungsradius zu Linsendurchmesser 0,70 beträgt. Die Linse L511 mit negativer Brechkraft ist die letzte Linse mit Brechkraft vor der Bildebene IM, so daß die konkave Linsenfläche S525 unmittelbar vor der Bildebene IM angeordnet ist. Der freie Arbeitsabstand zwischen der letzten Linse und der Bildebene IM beträgt 67,9mm.

[0067] Die Linsen der zweiten Linsengruppe 505 des zweiten Teilobjektivs 501 sind auf Minimierung der Störreflexe optimiert. Kritisch für Störreflexe sind im REMA-Objektiv 509 der Figur 5 die Linsenflächen S519, S522, S524 und S525, während bei den Linsenflächen S518, S520, S521 und S523 der am Retikel und den benannten Linsenflächen reflektierte äußere Hauptstrahl HS nicht mehr in die Bildebene gelangt. Bei Störreflexen zwischen der Bildebene IM und der Linsenfläche S519 schneidet der äußerste Hauptstrahl HS die Bildebene IM bei einer Höhe von 40,1mm, was einem Höhenverhältnis von 70,9% in Bezug auf die maximale Feldhöhe $Y_{\text{im}}^{\text{max}}$ von 56,6mm entspricht. Bei Störreflexen zwischen der Bildebene IM und der Linsenfläche S522 schneidet der äußerste Hauptstrahl HS die Bildebene IM bei einer Höhe von 58,6mm, was einem Höhenverhältnis von 103,5% in Bezug auf die maximale Feldhöhe $Y_{\text{im}}^{\text{max}}$ entspricht. Bei Störreflexen zwischen der Bildebene IM und der Linsenfläche S524 schneidet der äußerste Hauptstrahl HS die Bildebene IM bei einer Höhe von 52,4mm, was einem Höhenverhältnis von 92,6% in Bezug auf die maximale Feldhöhe $Y_{\text{im}}^{\text{max}}$ entspricht. Bei Störreflexen zwischen der Bildebene IM und der Linsenfläche S525 schneidet der äußerste Hauptstrahl HS die Bildebene IM bei einer Höhe von 180,7mm, was einem Höhenverhältnis von 319,3% in Bezug auf die maximale Feldhöhe $Y_{\text{im}}^{\text{max}}$ entspricht.

[0068] Die konkave Linsenfläche S525 weist einen Krümmungsradius von 96,08mm und einen Abstand von der Bildebene IM von 96,71mm auf, so daß die Brennebene der konkaven Linsenfläche S525, die zur Berechnung der Störreflexe als Spiegel fungiert, einen Abstand von 48,7mm zur Bildebene IM hat. Das Verhältnis dieses Abstandes zum halben Krümmungsradius beträgt 1,0, so daß sich ein möglicher Störreflex nur unwesentlich auswirkt.

[0069] Damit das Mittenbüschel mit geringen Inzidenzwinkeln auf die konkave Linsenfläche S521 trifft und somit geringe Aberrationen für die Feldabbildung eingeführt werden, wird die konkave Linsenfläche S521 möglichst konzentrisch zur Bildebene IM angeordnet. Das Verhältnis des Abstandes der Bildebene IM von dem Scheitel der konkaven Linsenfläche S521 zum Betrag des Krümmungsradius der konkaven Linsenfläche S521 beträgt 1,01.

[0070] Die Winkelabweichung zwischen den energetischen Schwerstrahlen und den Hauptstrahlen für das REMA-Objektiv 509 der Figur 5 ist in Figur 6 als durchgezogene Linie 613 für positive Feldhöhen dargestellt. Sie ist für alle Feldhöhen kleiner als $\pm 0,5\text{mrad}$.

[0071] Figur 7 zeigt in schematischer Darstellung ein erstes Ausführungsbeispiel einer Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlage 715, die in diesem Fall zwei Lichtquellen 717 und 717' aufweist. Als Lichtquelle 717 kann unter anderem ein DUV- oder VUV-Laser eingesetzt werden, beispielsweise ein ArF-Laser für 193nm, ein F₂-Laser für 157nm, ein Ar₂-Laser für 126nm und ein NeF-Laser für 109nm. Durch eine Strahlformungsoptik 719 wird ein paralleles Lichtbündel erzeugt, das auf ein Divergenz erhöhendes optisches Element 721 trifft. Als Divergenz erhöhendes optisches Element 721 kann beispielsweise eine Rasterplatte aus diffraktiven oder refraktiven Rasterelementen eingesetzt werden. Jedes Rasterelement erzeugt ein Strahlenbüschel, dessen Winkelverteilung durch Ausdehnung und Brennweite des Rasterelementes bestimmt ist. Die Rasterplatte befindet sich in der Objektebene eines nachfolgenden Objektivs 723 oder in deren Nähe. In der Blendenebene 725 des Objektivs 723 werden die von den Rasterelementen erzeugten Strahlenbüschel überlagert. Das Objektiv 723 kann als Zoom-Objektiv auslegt sein, um die Ausdehnung der Ausleuchtung der Blendenebene 725 zu variieren. Durch den Einsatz von zwei entlang der optischen Achse verschiebbaren Axikonlinsen unmittelbar vor der Blendenebene 725 kann auch eine annuläre Ausleuchtung mit variabler

Ringbreite erzielt werden. Ein derartiges Zoom-Axikon-Objektiv ist aus DE 44 41 947 A bekannt. Durch Tausch des Apertur erzeugenden Elementes 721 kann ebenfalls die Ausleuchtung variiert werden. Spezielle Apertur erzeugende Elemente 721 lassen auch die sogenannte Quadrupol-Beleuchtung mit vier separierten Bereichen zu. Die Blenden-ebene 725 des Objektivs 723 ist die Eintrittsebene eines Wabenkondensors 727. In der Nähe der Austrittsebene des Wabenkondensors 727 befindet sich eine Blenden-ebene APE des gesamten Beleuchtungssystems. In der Blenden-ebene APE kann die Ausleuchtung zusätzlich über Masken 729 oder Transmissionsfilter gesteuert werden. Auf den Wabenkondensor 727 folgt das Teilobjektiv 701 der Figur 1. Die den Elementen von Figur 1 entsprechenden Elemente in Figur 7 haben die gleichen Bezugszeichen wie in Figur 1 vermehrt um die Zahl 700. Für eine Beschreibung dieser Elemente wird auf die Beschreibung zu Figur 1 verwiesen. Zwischen der ersten Linsengruppe 703 und zweiten Linsengruppe 705 des Teilobjektivs 701 befindet sich ein Polarisations-Strahlteilerwürfel 731, der die von den Lichtquellen 717 und 717' ausgehenden Strahlengänge überlagert. Bis zum Strahlteilerwürfel 731 sind somit alle Komponenten der Beleuchtungseinrichtung zweifach vorhanden. Die Komponenten des zweiten Systemastes 737 bis zum Strahlteilerwürfel 731 weisen im Vergleich zum ersten Systemast 735 gestrichene Bezugszeichen auf. Damit die Überlagerung möglichst verlustfrei erfolgt, muß das Licht, das an der Strahlteilerfläche 733 transmittiert werden soll, in der Einfallsebene polarisiert sein, während das Licht, das an der Strahlteilerfläche 733 reflektiert werden soll, senkrecht zur Einfallsebene polarisiert sein muß. Dies läßt sich erreichen, indem in der Blenden-ebene APE polarisationsdrehende oder polarisationsselektive Mittel wie Polarisationsfilter oder $\lambda/4$ -Platten angebracht sind. Erzeugt die Lichtquelle 717 bereits linear polarisiertes Licht, so kann durch Ausrichtung der Lichtquelle 717 der Polarisationszustand entsprechend eingestellt werden. In der Bildebene IM des Teilobjektivs befindet sich das Retikel 739, das mit einem Projektionsobjektiv 741 auf den Wafer 743 abgebildet wird. Sowohl Retikel 739 wie auch Wafer 743 befinden sich auf einer nicht dargestellten Haltevorrichtung. Diese Haltevorrichtung läßt den Austausch von Retikel 739 und Wafer 743 zu. In sogenannten Scanner-Systemen werden Retikel 739 und Wafer 743 im Verhältnis des Abbildungsmaßstabes des Projektionsobjektivs 741 in Scan-Richtung bewegt.

[0072] Für das in Figur 7 nur schematisch dargestellte Projektionsobjektiv kann das Projektionsobjektiv der Figur 2 der DE 199 42 281.8 eingesetzt werden, das einen Abbildungsmaßstab von -0,25 aufweist. Die Systemdaten zu diesem Projektionsobjektiv sind in Tabelle 1 der DE 199 42 281.8 gegeben, wobei der Abstand zwischen der Objektebene und dem Scheitel der Linse L101 49,2885mm beträgt. Die Pupillenfunktion des Teilobjektivs 701 der Figur 1, dessen Systemdaten in Tabelle 1 der vorliegenden Anmeldung gegeben sind, ist an die Verteilung der Objektiv-Hauptstrahlwinkel des Projektionsobjektivs 741 genau angepaßt. Figur 8 zeigt die Abweichung der Pupillenfunktion des Teilobjektivs 701 von der Verteilung der Objektiv-Hauptstrahlwinkel als durchgezogene Linie 845. Die maximale Abweichung beträgt $\pm 0,4\text{mrad}$. Durch die Anpassung des Teilobjektivs 701 an das Projektionsobjektiv 741 ist es möglich, eine erhebliche Unterkorrektur der sphärischen Aberration der Pupillenaberration bei dem Projektionsobjektiv 741 zuzulassen.

[0073] Figur 9 zeigt in schematischer Darstellung ein zweites Ausführungsbeispiel einer Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlage 915. Die den Elementen von Figur 7 entsprechenden Elemente in Figur 9 haben die gleichen Bezugszeichen wie in Figur 7 vermehrt um die Zahl 200. Für eine Beschreibung dieser Elemente wird auf die Beschreibung zu Figur 7 verwiesen. Im zweiten Ausführungsbeispiel wird jedoch ein Glasstab 951 zur Homogenisierung der Lichtverteilung eingesetzt. Anstelle des Wabenkondensors und des Teilobjektivs weist die Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlage 915 ein weiteres Divergenz erhöhendes optisches Element 947, das Einkoppelobjektiv 949, den Glasstab 951, die Maskierungseinrichtung 953 und das REMA-Objektiv 909 auf, das die Maskierungseinrichtung 953 auf das Retikel 939 abbildet. Derartige Beleuchtungssysteme werden in der DE 195 20 563 A1 (US serial number 09/315267) beschrieben. Das REMA-Objektiv 909 ist dabei identisch zu dem REMA-Objektiv 309 der Figur 5, dessen Systemdaten in Tabelle 3 gegeben sind.

[0074] Der Glasstab 951 erzeugt in der Eintrittsebene 955 des Glasstabes 951 entsprechend der Anzahl der Reflexionen innerhalb des Glasstabes 951 virtuelle sekundäre Lichtquellen, die durch das erste Teilobjektiv 911 des REMA-Objektivs 909 abgebildet werden. Die Bilder der virtuellen sekundären Lichtquellen liegen dabei nicht in der Blenden-ebene APE, sondern in Richtung der Bildebene IM defokussiert. Während das erste Teilobjektiv 911 die im Unendlichen liegende Eintrittspupille auf die Blenden-ebene APE abbildet, werden die im Abstand der Glasstablänge liegenden virtuellen sekundären Lichtquellen in den Bereich zwischen den Linsen L35 und L36 abgebildet. Das REMA-Objektiv 909 ist vorteilhaft derart ausgelegt, daß die Ebene mit den Bildern der virtuellen sekundären Lichtquellen und den damit verbundenen starken Intensitätsschwankungen nicht auf einer Linse zu liegen kommt, um Materialschädigungen zu vermeiden. Dies wird erreicht, indem die Linse L35 nahe der Blenden-ebene APE angeordnet ist, während zwischen der Linse L35 und L36 ein ausreichend großer Luftraum vorhanden ist. Eine andere Möglichkeit wäre, für Linsen am Ort der Bilder der virtuellen sekundären Lichtquellen strahlungsbeständige Linsenmaterialien wie Fluorid-Kristalle einzusetzen.

[0075] Durch den Glasstab 951 wird in der Objektebene des REMA-Objektivs 909 ein rechteckiges Feld beleuchtet, in dem die Intensitätsschwankungen kleiner 2 % sind. Das REMA-Objektiv 909 bildet dieses homogen beleuchtete Feld auf das Retikel ab, wobei die Beleuchtungsverteilung auf dem Retikel nahezu unabhängig von der Ausleuchtung

der Blendenebene APE ist, die zuvor beispielsweise mit einem Zoom-Axikon-Objektiv eingestellt wurde. Die Intensitätsschwankungen, die durch die variable Blendenausleuchtung erzeugt werden, sind vorteilhafterweise kleiner $\pm 1\%$. Beim REMA-Objektiv 909 betragen die Intensitätsschwankungen nur $\pm 0,2\%$. Dies gelingt durch die Korrektur der aper-
turabhängigen Bildfehler.

[0076] Für das in Figur 9 nur schematisch dargestellte Projektionsobjektiv kann das Projektionsobjektiv der Figur 8 der DE 199 42 281.8 eingesetzt werden, das einen Abbildungsmaßstab von -0,25 aufweist. Die Systemdaten sind in Tabelle 4 dieser Patentschrift gegeben, wobei der Abstand zwischen der Objektebene und dem Scheitel der Linse L401 33,4557mm beträgt. Die Pupillenfunktion des REMA-Objektives 909 ist an die Verteilung der Objektiv-Hauptstrahlwinkel des Projektionsobjektives 934 genau angepaßt. Figur 10 zeigt die Abweichung der Pupillenfunktion des Teilobjektives von der Verteilung der Objektiv-Hauptstrahlwinkel als durchgezogene Linie 1045. Die maximale Abweichung beträgt 0,34mrad.

[0077] Mit den Ausführungsbeispielen wird eine Möglichkeit aufgezeigt, Beleuchtungssysteme bereit zu stellen, die eine Unterkorrektur der sphärischen Aberration der Pupillenabbildung in einem nachfolgenden Projektionsobjektiv zulassen. Dadurch lassen sich Korrektionsmittel innerhalb des Projektionsobjektives einsparen.

Linse	Fläche	Radius [mm]	Dicke [mm]	Material	Durchmesser [mm]
	APE	0.00	15.59		187.9
L11	S102	260.32	39.87	SiO2	195.5
	S103	567.25	135.51		191.1
L12	S104	234.09	15.00	SiO2	184.3
	S105	180.39	259.04		178.1
	S106	0.00	206.08		213.7
L13	S107	1539.49	38.23	SiO2	245.5
	S108	-306.69	52.29		245.8
L14	S109	130.37	52.39	SiO2	190.4
	S110	844.68	15.14		175.2
L15	S111	555.42	5.86	SiO2	160.8
	S112	100.69	79.74		134.3
	IM	0.00	0.00		116.0

$$z = \frac{\frac{1}{R}h^2}{1 + \sqrt{1 - (1 - EX)\left(\frac{1}{R}\right)^2 h^2}} + \sum_{k=1} c_k h^{2k+2}$$

z: Pfeilhöhe; h: Höhe; R: Radius; EX: Exzentrizität; C_k : Asphärenkonstanten

Tabelle 1:

Optische Daten des Teilobjektives der Figur 1					
Fläche	EX	C1	C2	C3	C4
S102	-0.6130	-9.1133E-09	1.0931E-12	-1.1885E-16	4.3105E-21
S104	3.5118	2.6731E-08	-1.1221E-12	7.9601E-17	-4.1294E-21
S111	2.0197E+12	-5.5586E-08	4.3580E-12	-1.9413E-16	2.3919E-21

EP 1 235 112 A2

	Fläche	Radius [mm]	Dicke [mm]	Material	Durchmesser [mm]
	OBJ	0.00	32.95		31.2
L31	S302	-38.69	37.88	CaF2	61.9
	S303	-73.41	0.90		114.4
L32	S304	2696.07	33.32	CaF2	168.2
	S305	-191.13	0.90		178.0
L34	S306	329.78	41.98	SiO2	216.0
	S307	-514.77	28.53		219.1
L35	S308	334.07	34.03	SiO2	227.6
	S309	-570.33	161.49		227.6
	APE	0.00	6.00		188.0
L36	S311	130.20	30.35	SiO2	195.8
	S312	324.12	99.95		192.5
L37	S313	211.39	11.40	SiO2	168.8
	S314	127.10	230.32		158.8
	S315	0.00	216.90		197.4
L38	S316	-851.36	37.33	SiO2	237.1
	S317	-237.99	0.90		240.0
L39	S318	133.05	46.59	SiO2	212.7
	S319	275.70	42.03		200.4
L310	S320	240.69	12.00	SiO2	162.1
	S321	101.80	91.62		138.5
	IM	0.00	0.00		116.2

$$z = \frac{\frac{1}{R} h^2}{1 + \sqrt{1 - (1 - EX) \left(\frac{1}{R}\right)^2 h^2}} + \sum_{k=1} c_k h^{2k+2}$$

z: Pfeilhöhe; h: Höhe; R: Radius; EX: Exzentrizität; C_k: Asphärenkonstanten

Tabelle 3:

Tabelle 3: Optische Daten des Teilobjektives der Figur 3					
Fläche	EX	C1	C2	C3	C4
S308	-2.4978	-4.3481E-08	-7.8594E-14	-2.0935E-17	8.6082E-23
S311	0.2840	-4.1616E-08	-1.1523E-12	-4.8136E-18	-5.8384E-21
S313	0.6222	-3.5043E-08	1.0875E-12	2.1557E-16	-3.6907E-21
S320	0.9715	-5.9896E-08	-2.8284E-12	1.2407E-16	2.9936E-21

EP 1 235 112 A2

Linse	Fläche	Radius [mm]	Dicke [mm]	Material	Durchmesser [mm]
	OBJ	0.00	44.12		32.4
L51	S502	-42.28	30.35	SiO2	73.0
	S503	-78.14	0.90		121.7
L52	S504	-338.66	37.30	SiO2	163.1
	S505	-124.59	0.86		177.2
L53	S506	2979.91	45.50	SiO2	221.0
	S507	-219.18	1.65		228.3
L54	S508	5302.65	40.00	SiO2	241.5
	S509	-230.16	156.30		244.0
L55	S510	-377.28	26.00	SiO2	241.3
	S511	-224.20	40.60		243.4
	APE	0.00	6.00		217.2
L56	S513	212.83	39.70	SiO2	216.9
	S514	1296.09	120.30		211.7
L57	S515	523.30	11.70	SiO2	166.8
	S516	128.28	148.73		155.8
	S517	0.00	113.55		233.3
L58	S518	146.29	33.90	SiO2	219.7
	S519	345.28	94.30		216.2
L59	S520	-268.89	55.00	SiO2	208.1
	S521	-200.89	0.80		216.3
L510	S522	1616.33	35.50	SiO2	202.3
	S523	-174.93	2.20		199.1
L511	S524	256.46	15.90	SiO2	163.9
	S525	96.08	96.71		137.4
	IM	0.00	0.00		113.3

$$z = \frac{\frac{1}{R} h^2}{1 + \sqrt{1 - (1 - EX) \left(\frac{1}{R}\right)^2 h^2}} + \sum_{k=1} C_k h^{2k+2}$$

z: Pfeilhöhe; h: Höhe; R: Radius; EX: Exzentrizität; C_k: Asphärenkonstanten

Tabelle 5:

Optische Daten des Teilobjektives der Figur 5						
Fläche	EX	C1	C2	C3	C4	C5
S509	-1.1741	3.9084E-08	3.8630E-13	6.5586E-17	-3.3899E-21	1.2432E-25
S513	-0.2501	-2.1870E-08	5.4913E-14	-7.7358E-17	4.1956E-21	-1.2014E-25

Tabelle 5: (fortgesetzt)

Optische Daten des Teilobjektives der Figur 5						
Fläche	EX	C1	C2	C3	C4	C5
S518	0.2356	-3.4023E-08	-1.0405E-12	7.3414E-17	-9.7841E-21	3.0608E-25
S523	-0.8321	1.4350E-07	-4.9565E-12	5.7530E-16	-3.6123E-20	1.5494E-24

Patentansprüche

1. Teilobjektiv (1, 301, 501) mit einer optischen Achse (OA) zur Beleuchtung eines Bildfeldes, insbesondere in einer Beleuchtungseinrichtung einer Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlage, wobei

- das Teilobjektiv (1, 301, 501) zwischen einer Blendenebene (APE) und einer Bildebene (IM) angeordnet ist,
- von der Blendenebene (APE) Strahlbüschel mit je einem Hauptstrahl ausgehen, wobei die Schnittpunkte der Hauptstrahlen mit der optischen Achse (OA) maximal 10% des Durchmessers der Blendenebene (APE) auseinander liegen, und
- das Teilobjektiv (1, 301, 501) eine erste Linsengruppe (3, 303, 503) und eine zweite Linsengruppe (5, 305, 505) umfaßt, wobei innerhalb der ersten Linsengruppe (3, 303, 503) ein äußerster Hauptstrahl (HS), der mit maximalem Winkel zur optischen Achse (OA) durch die Blendenebene (APE) läuft, dem Betrag nach kleinere Strahlhöhen an den Linsenflächen aufweist als ein Randstrahl (RS), der das Strahlbüschel begrenzt, dessen Hauptstrahl entlang der optischen Achse (OA) verläuft, während innerhalb der zweiten Linsengruppe (5, 305, 505) der äußerste Hauptstrahl (HS) dem Betrag nach größere Strahlhöhen an den Linsenflächen aufweist als der genannte Randstrahl (RS), und wobei die zweite Linsengruppe (5, 305, 505) eine Linse (L15, L39, L510) mit einer ersten asphärischen Linsenfläche (S111, S320, S523) aufweist,

dadurch gekennzeichnet,

- daß die zweite Linsengruppe (5, 305, 505) mindestens eine erste Linse (L15, L39, L511) mit negativer Brechkraft und mindestens eine zweite Linse (L14, L38, L58) mit positiver Brechkraft aufweist,
- die maximale Feldhöhe Y_{im}^{max} innerhalb des Bildfeldes mindestens 40mm und die bildseitige numerische Apertur mindestens 0,15 beträgt, und
- die Hauptstrahlen innerhalb des Bildfeldes eine Feldhöhe Y_{im} und einen Hauptstrahlwinkel PF zwischen der Flächennormalen der Bildebene (IM) und dem jeweiligen Hauptstrahl aufweisen, wobei die Verteilung der Hauptstrahlwinkel PF über der Feldhöhe Y_{im} durch eine Pupillenfunktion $PF(Y_{im})$ gegeben ist, die sich aus einem linearen und einem nichtlinearen Beitrag zusammensetzt

$$PF(Y_{im}) = c_1 \cdot Y_{im} + PF_{NL}(Y_{im}),$$

wobei c_1 der Steigung der Pupillenfunktion bei der Feldhöhe $Y_{im} = 0$ mm entspricht und der nichtlineare Beitrag $PF_{NL}(Y_{im})$ für die maximale positive Feldhöhe Y_{im}^{max} mindestens +15mrad beträgt.

2. Teilobjektiv nach Anspruch 1, wobei die erste Linse (L15, L39, L511) eine zur Bildebene (IM) konkave Linsenfläche (S112, S321, S525) aufweist.
3. Teilobjektiv nach Anspruch 2, mit einem Krümmungsradius und einem Linsendurchmesser der konkaven Linsenfläche (S112, S321, S525), wobei das Verhältnis des Krümmungsradius zu dem Linsendurchmesser kleiner als 1,0, vorzugsweise kleiner als 0,8 ist.
4. Teilobjektiv nach einem der Ansprüche 2 bis 3, wobei die erste Linse (L39, L511) ein Meniskus ist.
5. Teilobjektiv nach einem der Ansprüche 2 bis 4, wobei in Bezug auf die Lichtrichtung nach der ersten Linse (L15, L39, L511) keine weitere Linse mit optischer Brechkraft angeordnet ist.

6. Teilobjektiv nach Anspruch 5, mit einem Abstand des Scheitels der konkaven Linsenfläche (S112, S321, S525) von der Bildebene (IM) und mit einem Betrag des Krümmungsradius der konkaven Linsenfläche (S112, S321, S525), wobei das Verhältnis von besagtem Abstand zu besagtem Betrag einen Wert zwischen 0,7 und 1,3 aufweist.
- 5 7. Teilobjektiv nach einem der Ansprüche 5 und 6, mit einem ersten Abstand des Scheitels der konkaven Linsenfläche (S112, S321, S525) von der Bildebene (IM), mit einem durch den halben Krümmungsradius der konkaven Linsenfläche (S112, S321, S525) gegebenen zweiten Abstand und mit einer Differenz zwischen dem ersten und zweiten Abstand, wobei der Betrag des Verhältnisses von der genannten Differenz zu dem zweiten Abstand größer als 0,3 ist.
- 10 8. Teilobjektiv nach einem der Ansprüche 1 bis 7, wobei die Bildebene (IM) und die Linsenflächen der zweiten Linsengruppe (5, 305, 505) die einfallenden Strahlen teilweise reflektieren und wobei der äußerste Hauptstrahl (HS) nach einer Reflexion an der Bildebene (IM) und einer Reflexion an einer Linsenfläche der zweiten Linsengruppe (5, 305, 505) in der Bildebene (IM) eine Strahlhöhe aufweist, die mindestens 30% der maximalen Feldhöhe Y_{im}^{max} beträgt.
- 15 9. Teilobjektiv nach einem der Ansprüche 1 bis 8, mit einer Pfeilhöhenabweichung der ersten asphärischen Linsenfläche (S111, S320, S523) zu einer Hüllsphäre, welche die asphärische Linsenfläche (S111, S320, S523) im Scheitel und am Rand des ausgeleuchteten Bereiches der asphärischen Linsenfläche (S111, S320, S523) schneidet, wobei der Betrag der maximalen Pfeilhöhenabweichung mindestens 0,2mm, vorzugsweise mindestens 0,4mm beträgt.
- 20 10. Teilobjektiv nach einem der Ansprüche 1 bis 9, mit einem bildseitigen Arbeitsabstand, wobei der bildseitige Arbeitsabstand mindestens 30mm, vorzugsweise mindestens 40mm beträgt.
- 25 11. Teilobjektiv nach einem der Ansprüche 1 bis 10, wobei der nichtlineare Beitrag $PF_{NL}(Y_{im})$ für die maximale positive Feldhöhe Y_{im}^{max} mindestens +25mrad beträgt.
- 30 12. Teilobjektiv nach einem der Ansprüche 1 bis 11, wobei mindestens eine weitere Linse (L58) der zweiten Linsengruppe (505) eine zweite asphärische Linsenfläche (S518) aufweist.
- 35 13. Teilobjektiv nach Anspruch 12, mit einer Pfeilhöhenabweichung der zweiten asphärischen Linsenfläche (S518) zu einer Hüllsphäre, welche die zweite asphärische Linsenfläche (S518) im Scheitel und am Rand des ausgeleuchteten Bereiches der zweiten asphärischen Linsenfläche (S518) schneidet, wobei der Betrag der maximalen Pfeilhöhenabweichung mindestens 0,2mm, vorzugsweise mindestens 0,4mm beträgt.
- 40 14. Teilobjektiv nach einem der Ansprüche 1 bis 13, wobei für die maximale Feldhöhe Y_{im}^{max} das Verhältnis des nichtlinearen Beitrags $PF_{NL}(Y_{im}^{max})$ zum linearen Beitrag $c_1 \cdot Y_{im}^{max}$ im Bereich von -0,5 und -2,0 liegt.
- 45 15. Teilobjektiv nach einem der Ansprüche 1 bis 14, wobei alle Strahlenbüschel, die die bildseitige numerische Apertur vollständig füllen, in der Bildebene (IM) innerhalb des Bildfeldes je ein Spotbild mit einem Durchmesser erzeugen und der maximale Durchmesser von allen Spotbildern 2% der maximalen Feldhöhe Y_{im}^{max} beträgt.
16. Teilobjektiv nach einem der Ansprüche 1 bis 15, wobei die zweite Linse (L14, L38, L58) mit positiver Brechkraft ein Meniskus ist.
17. Teilobjektiv nach einem der Ansprüche 1 bis 16, wobei die zweite Linsengruppe (5, 305, 505) drei bis fünf Linsen mit endlicher Brennweite aufweist.
- 50 18. Teilobjektiv nach einem der Ansprüche 1 bis 17, wobei die zweite Linsengruppe (5, 505) eine Bikonvexlinse (L13, L510) aufweist.
19. REMA-Objektiv (309, 509) zur Abbildung eines Objektfeldes auf ein Bildfeld, umfassend
 - ein erstes Teilobjektiv (311, 511), das zwischen einer Objektebene (OBJ) und einer Blendenebene (APE) angeordnet ist, und
 - ein zweites Teilobjektiv (301, 501) nach mindestens einem der vorangehenden Ansprüche, das zwischen der Blendenebene (APE) und einer Bildebene (IM) angeordnet ist,

wobei das erste Teilobjektiv (311, 511) und das zweite Teilobjektiv (301, 501) eine gemeinsame optische Achse (OA) aufweisen,
 von dem Objektfeld ausgehende Hauptstrahlen die optische Achse (OA) im Bereich der Blendenebene (APE) schneiden,
 und das REMA-Objektiv (309, 509) das Objektfeld mit drei- bis achtfacher Vergrößerung auf das Bildfeld in der Bildebene (IM) abbildet.

20. REMA-Objektiv nach Anspruch 19, wobei jedes Strahlenbündel, das von einem Punkt innerhalb des Objektfeldes ausgeht und in der Bildebene (IM) die bildseitige numerische Apertur vollständig füllt, innerhalb des Bildfeldes ein Spotbild erzeugt und der maximale Durchmesser der Spotbilder maximal 2% der maximalen Feldhöhe Y_{im}^{max} beträgt.

21. REMA-Objektiv nach einem der Ansprüche 19 und 20, wobei die Hauptstrahlen telezentrisch von der Objektebene (OBJ) ausgehen.

22. REMA-Objektiv nach einem der Ansprüche 19 bis 21, wobei für jede Feldhöhe Y_{im} in der Bildebene (IM) ein Hauptstrahl und ein energetischer Schwerstrahl mit einer Winkelabweichung zwischen dem energetischen Schwerstrahl und dem Hauptstrahl gegeben sind und die maximale Winkelabweichung für alle Feldhöhen kleiner als 2mrad, vorzugsweise kleiner als 2mrad ist.

23. Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlage (715, 915) umfassend

- eine Beleuchtungseinrichtung mit einem Teilobjektiv (701, 901) nach mindestens einem der vorangehenden Ansprüche,
- ein Projektionsobjektiv (741, 941), das ein Objektfeld in einer Objektebene auf ein Bildfeld in einer Bildebene abbildet, wobei das Projektionsobjektiv (741, 941) eine objektseitige Objektiv-Pupillenfunktion aufweist, die sich als Verteilung von Objektiv-Hauptstrahlwinkeln über Objekthöhen innerhalb des Objektfeldes des Projektionsobjektives (741, 941) ergibt, wobei das Teilobjektiv (701, 901) und das Projektionsobjektiv (741, 941) eine gemeinsame optische Achse (OA) aufweisen, die Bildebene (IM) des Teilobjektives (701, 901) und die Objektebene des Projektionsobjektives (741, 941) in einer gemeinsamen Ebene liegen, und die Abweichung der Pupillenfunktion des Teilobjektives von der objektseitigen Objektiv-Pupillenfunktion für alle Feldhöhen innerhalb des Bildfeldes des Teilobjektives (701, 901) kleiner als 2mrad, vorzugsweise kleiner als 2mrad ist.

FIG.1

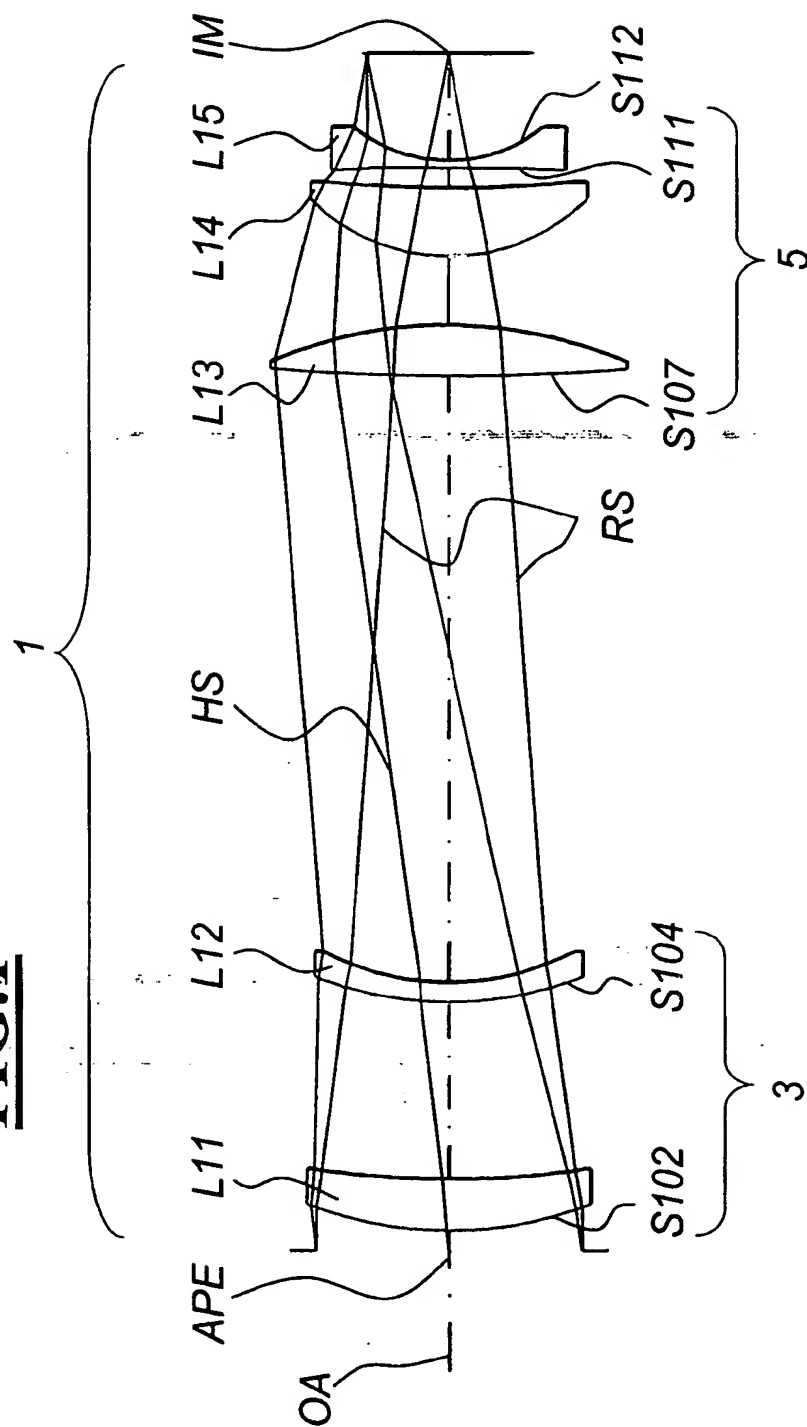


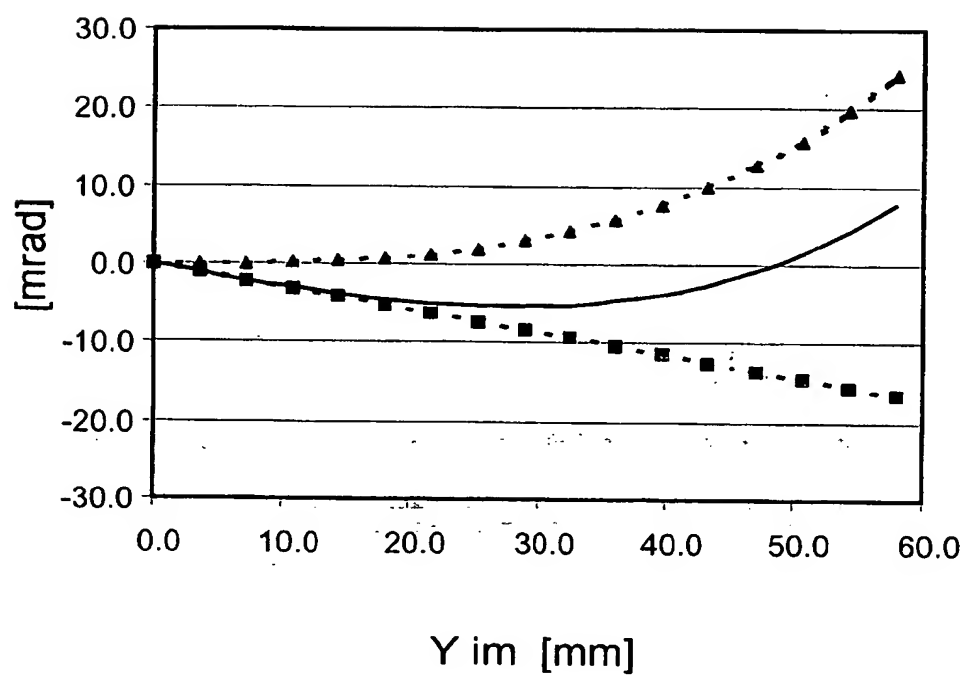
FIG.2

FIG.3

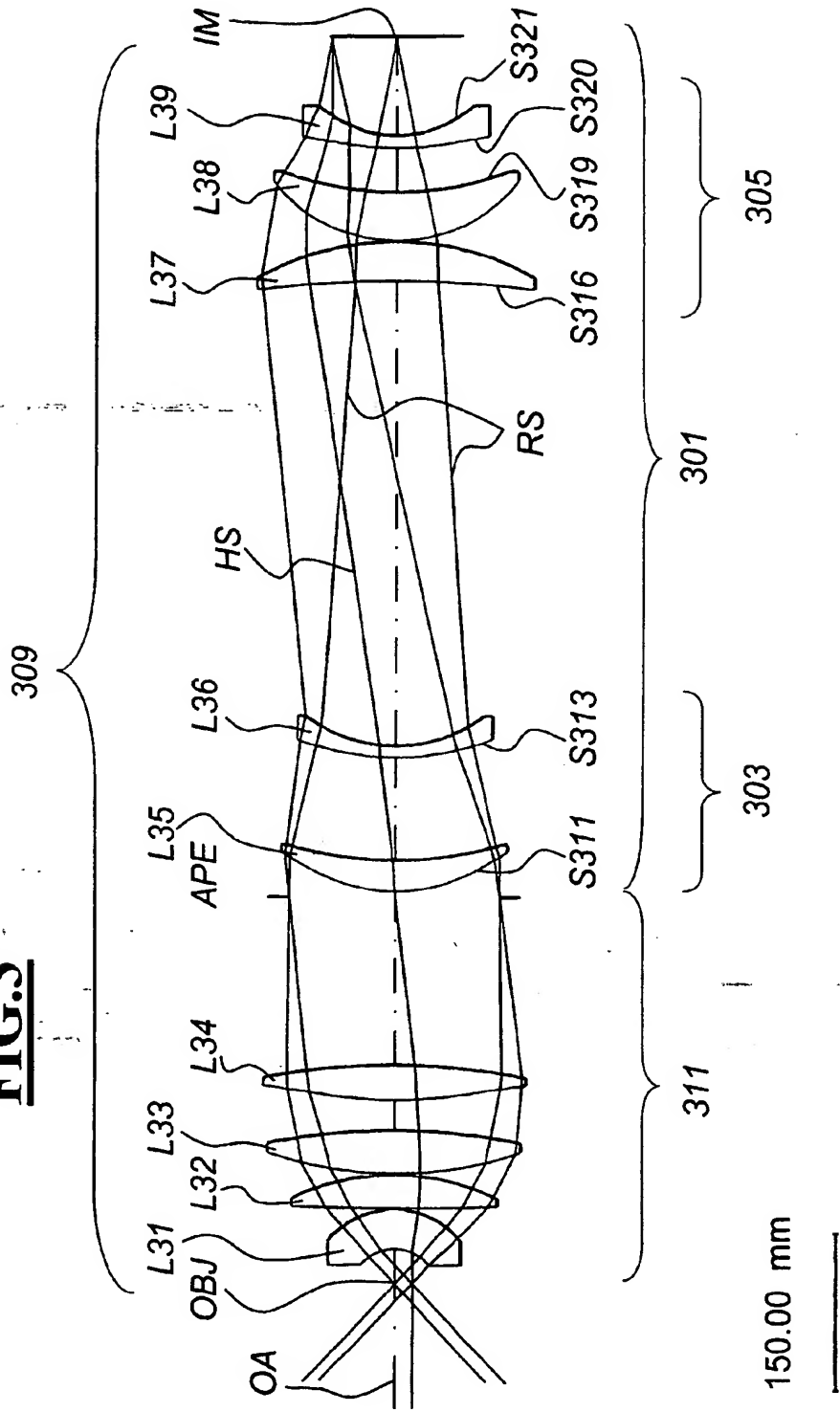


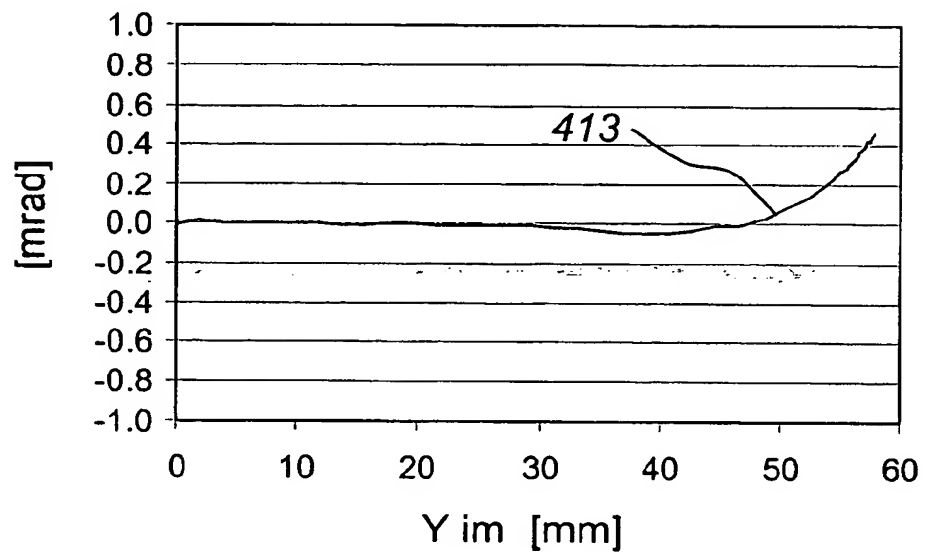
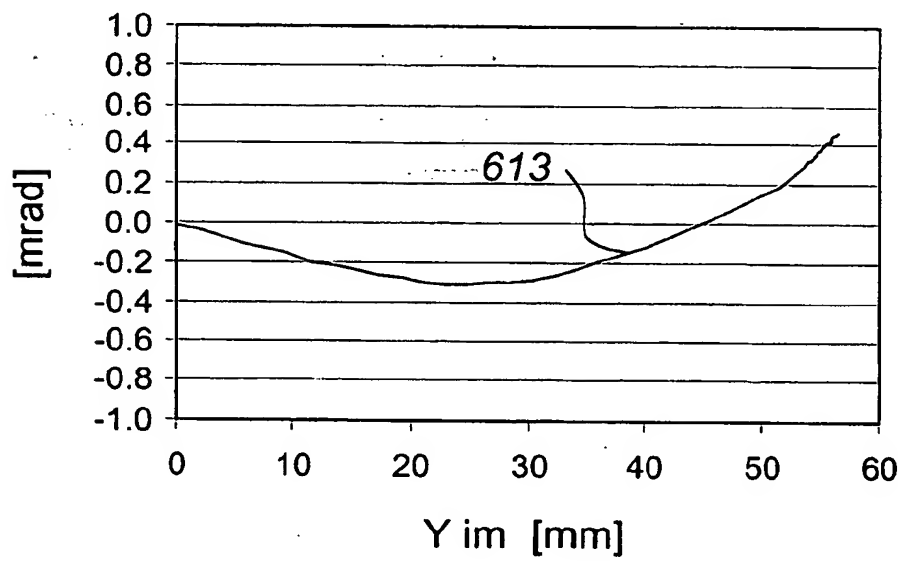
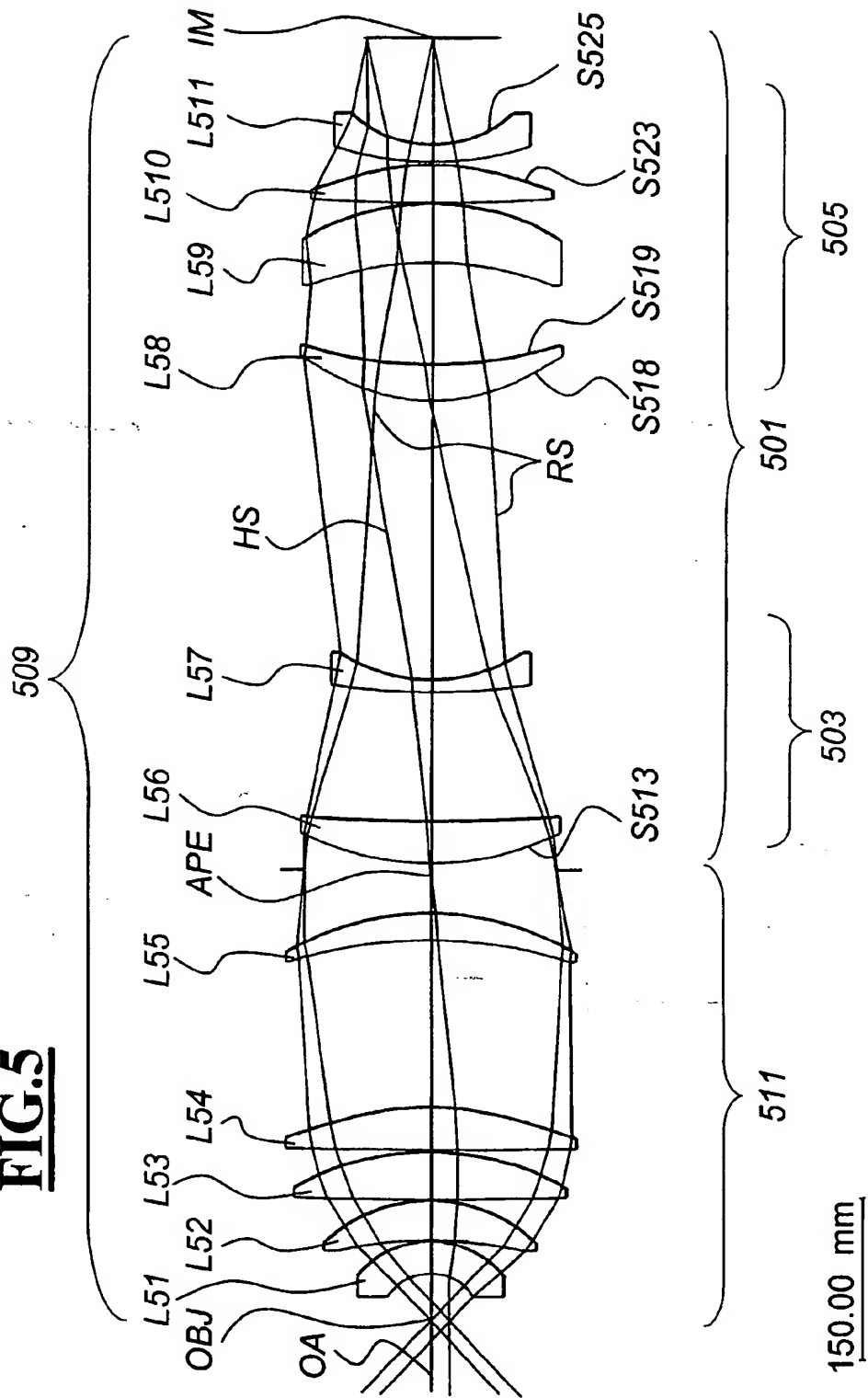
FIG.4**FIG.6**

FIG.5



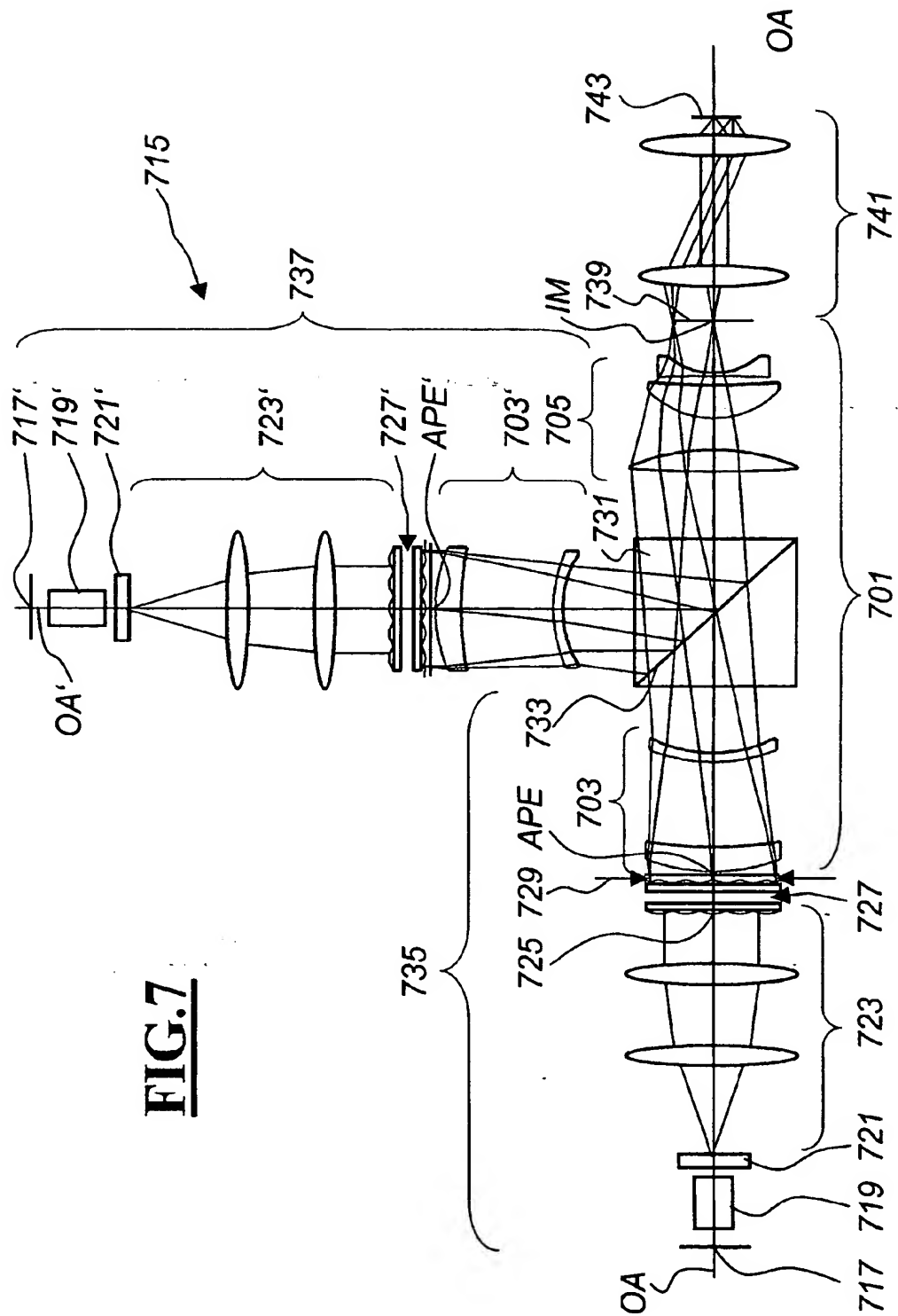


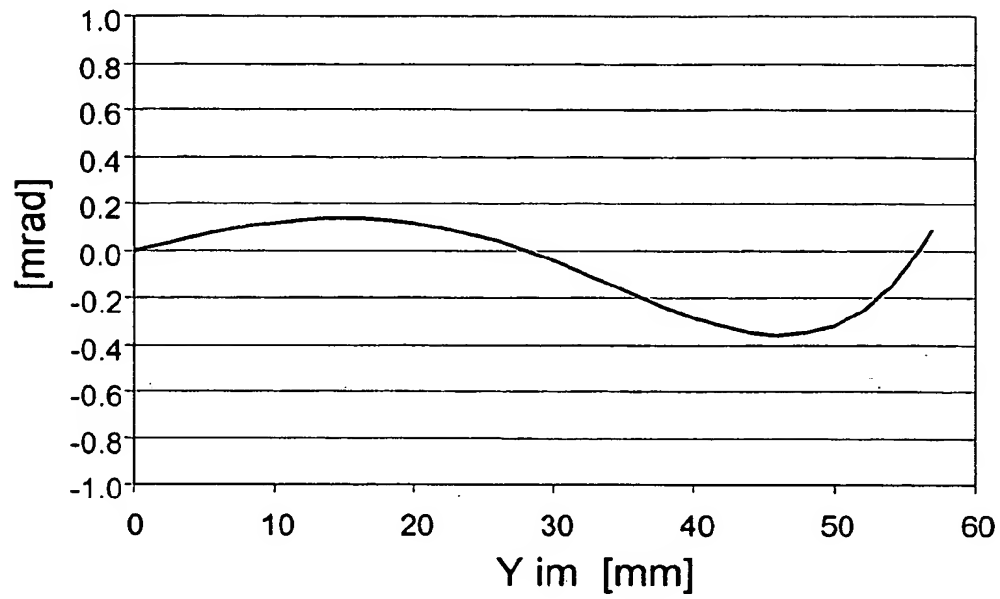
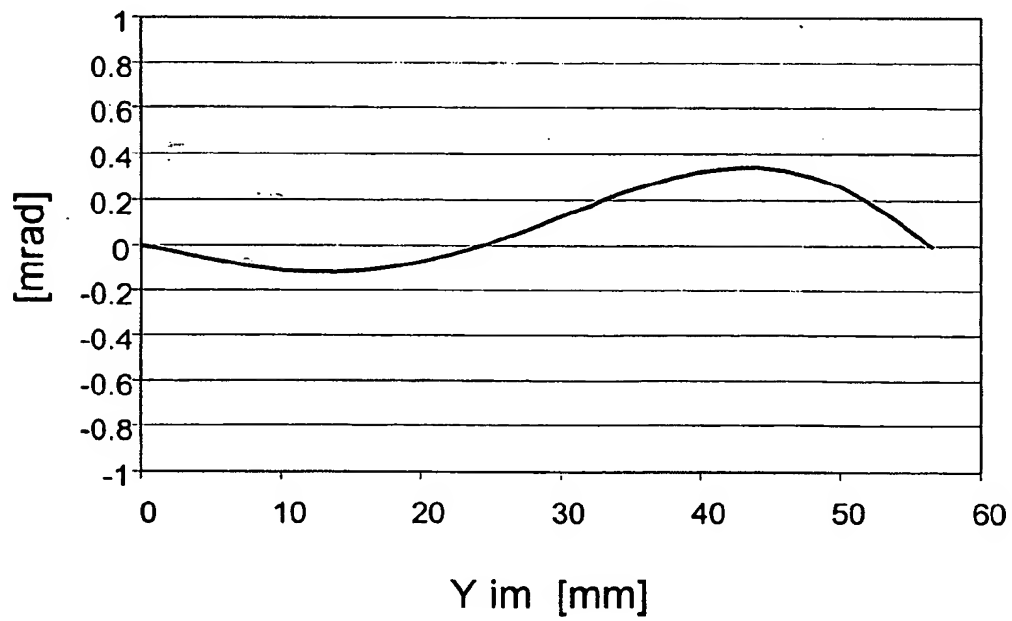
FIG.8**FIG.10**

FIG.9

